



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ULB

Experimentelle Analyse und phänomenologisch basierte Modellierung des Deformationsverhaltens von prismatischen Lithium-Ionen-Zellen unter mechanischer Last

Kotter, Philip
(2020)

DOI (TUprints): <https://doi.org/10.25534/tuprints-00014040>

Lizenz:



CC-BY-SA 4.0 International - Creative Commons, Attribution Share-alike

Publikationstyp: Ph.D. Thesis

Fachbereich: 16 Department of Mechanical Engineering

Quelle des Originals: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/14040>

Experimentelle Analyse und phänomenologisch basierte Modellierung des Deformationsverhaltens von prismatischen Lithium-Ionen-Zellen unter mechanischer Last

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von
Dipl.-Ing. Univ. Philip Kotter

Berichterstatter: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Melz
Mitberichterstatter: 2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wilfried Becker

Tag der Einreichung: 09.10.2019
Tag der mündlichen Prüfung: 27.11.2019
Darmstadt 2019
D17

Experimentelle Analyse und phänomenologisch basierte Modellierung des Deformationsverhaltens von prismatischen Lithium-Ionen-Zellen unter mechanischer Last

Experimental analysis and phenomenologically based modeling of the deformational behavior of prismatic lithium ion cells under mechanical load

Genehmigte Dissertation von Philip Kotter, Dipl.-Ing. aus München

Tag der Einreichung: 09.10.2019

Tag der Prüfung: 27.11.2019

Darmstadt 2020 - D17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-140409

URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/14040>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

CC BY-SA 4.0 International: Namensnennung, Weitergabe zu gleichen Bedingungen

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/legalcode.de>

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit im Bereich Entwicklung Hochvoltspeicher bei der BMW Group in München. Teile der Arbeit wurden während dieser Zeit veröffentlicht. Selbstzitate werden in der Regel unterlassen.

Ich bedanke mich bei Prof. Tobias Melz für die Übernahme der Betreuung meiner Arbeit, insbesondere für das entgegengebrachte Vertrauen hinsichtlich der eigenständigen Ausgestaltung der Forschungsinhalte.

Bei Prof. Wilfried Becker bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats und dem damit verbundenen Interesse an meiner Arbeit.

Prof. Thilo Bein gilt mein Dank für die operative Betreuung des Promotionsvorhabens, die stets von hilfreicher und vertrauensvoller Anleitung geprägt war.

Besonderer Dank gilt Andreas Schleicher für die Betreuung im Fachbereich der BMW Group und das entgegen gebrachte Vertrauen sowie stete Interesse. Die zahlreichen Diskussionen und Anregungen prägen die Arbeit.

Stellvertretend für den Fachbereich bedanke ich mich bei Robert Lustig für die Ermöglichung und Unterstützung meiner Forschungsbemühungen. Besonders erwähnen möchte ich meine Kollegen Felix Laasch, Julian Patscheider und Benedikt Raidt. Einige Umfänge dieser Arbeit wären ohne ihre Unterstützung, jedoch insbesondere nicht ohne Jonas Seifert und Maximilian Altmann, entstanden.

Weiterhin danke ich Dr. Thomas Kisters für den stets konstruktiven Austausch.

Besonders bedanke ich mich bei Martin Heger, Jan Feddersen, Stephan Siering, Remo Rechkemmer, Tobias Forst, Michael Fett und Alke Zollenkopf, die ein Quell von Rückhalt und notwendigem Ausgleich waren.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die durch ihre stete und unbedingte Unterstützung wesentlich zum Gelingen beitrug.

Philip Kotter

München, 2019

Kurzfassung

Bei der Entwicklung von Automobilen nehmen elektrifizierte Antriebe mit Lithium-Ionen-Batterien eine zunehmend bedeutende Rolle ein. Ein entscheidendes Differenzierungsmerkmal für Fahrzeuge ist eine hinreichende Reichweite. Die Maximierung des hierfür notwendigen Energieinhalts bedingt Dimensionen der Energiespeicher, die einen signifikanten Gewichts- und Volumenanteil einnehmen und aufgrund dessen in die Fahrzeugstruktur integriert werden. Folglich entfallen vormals in der Rohkarosserie verortete mechanische Funktionen im Gesamtfahrzeug auf den Hochvoltpeicher und dessen Gehäuse - insbesondere bezüglich der passiven Sicherheit. Deren Ziele werden in diesem Zusammenhang - neben dem klassischen Insassenschutz - um den Schutz des energetischen Materials im Inneren erweitert. Limitierend ist hierbei die mechanische Belastbarkeit der zur Batterie aggregierten Einzelzellen, da deren Überschreitung zu zellinternen Kurzschlüssen mit möglichem thermischem Durchgehen der Zellen führt. Diese ist gesamthaft weitgehend und hinsichtlich des im automobilen Bereich verbreiteten prismatischen Zellformats gänzlich unerforscht.

Mittels eines extensiven Versuchsprogramms werden die Eigenschaften dieses Zelltyps analysiert. Vier Parameter werden vorgeschlagen, um die mechanische Performanz zu charakterisieren und eine Vergleichbarkeit hinsichtlich interessierender Einflussgrößen zu ermöglichen. Hierbei sind eine dehnratensensitive Verfestigungsreaktion, Kompressibilität und Belastbarkeit zu beobachten. Der elektrische Ladegrad als zentrale Eigenschaft des Betriebs zeigt hingegen einen vernachlässigbaren Einfluss. Hinsichtlich der Belastungsrichtung relativ zum internen, laminaren Aufbau weisen die Zellen signifikante Unterschiede in der Belastbarkeit auf. Industriell standardisierte, zunehmende Reifegrade der Prüflinge identischer Bauform korrelieren positiv mit den statistischen Maßzahlen der Kennwerte. Folglich eignen sich bereits frühe Prototypen zur Analyse für die Auslegung und gegebenenfalls Homologationen.

Aufgrund des automobilen Anwendungsfalls wird ein homogenisiertes Ersatzmaterial zur Abbildung der identifizierten Phänomene plastischen Materialverhaltens vorgeschlagen. Durch die analytische Beschreibung der experimentellen Szenarien basierend auf dem Prinzip der virtuellen Arbeit leiten sich konstitutive Ansatzfunktionen zur Beschreibung der Verfestigung her. Diese werden aufgrund des makroskopisch inkompressiblen Verhaltens mit einem Von-Mises-Fließkriterium in eine Finite-Elemente-Methode implementiert und parametrisiert. Zur Kalibrierung dient ein durch statistische Versuchsplanung erzeugter Trainingsdatensatz für die als Antwortfläche eingesetzten künstlichen neuronalen Netze. Der Abgleich zu den Versuchsergebnissen mittels kleinster Quadrate ergibt einen Parametersatz, der eine Prognose der Verfestigung als Maß der plastischen Dissipation mit einem Pearson-Korrelationskoeffizienten $> 0,8$ über fünf Größenordnungen an Belastungsgeschwindigkeiten ermöglicht. Die vorgeschlagene Beurteilung der Kritikalität von Lasteinträgen erfolgt durch die virtuelle Ermittlung von Dehnung und Dehnrate mit anschließendem Vergleich zu den normierten Intrusionen und Deformationsgeschwindigkeiten. Ab-

Kurzfassung

schließlich ist festzustellen, dass die in Crash-Situationen auftretenden Residualgeschwindigkeiten beim Auftreffen auf die Zellen zu hoch sind, um eine Belastung und Deformation bei zukünftigen Fahrzeugkonzepten mit ausreichender Sicherheit zuzulassen.

Im Rahmen der Dissertation wird ein durchgängiger Prozess zur systematischen, experimentellen Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Lithium-Ionen-Zellen entwickelt und in eine crashmechanische Modellierung für die Finite-Elemente-Methode implementiert. Am Beispiel des bislang unerforschten prismatischen Zellformats werden existierende Modellierungsansätze teils bestätigt und der Stand der Technik insbesondere um Erkenntnisse hinsichtlich des Betriebszustands, des dynamischen Verhaltens und des technischen Heranreifens der Komponente erweitert.

Summary

Electrified drives with lithium-ion batteries are playing an increasingly important role in the development of automobiles. A differentiating factor for vehicles is a sufficient range. Maximizing the energy content requires dimensions of the electric energy storage systems, which take up a significant proportion of weight and volume and are therefore integrated into the vehicle structure. As a result, mechanical functions previously located in the car body are transferred to the batteries and its housing - especially with regard to passive safety. In this context, their objectives are extended - in addition to classic occupant protection - to include the protection of the energetic material inside the vehicle. A limiting factor here is the mechanical loading of the individual cells aggregated to form the battery, since exceeding these capabilities leads to cell-internal short circuits with possible thermal runaway of the cells. This is largely unexplored with regard to the prismatic cell format that is widely used in the automotive industry.

The properties of this cell type are analyzed with an extensive experimental program. Four parameters are proposed to characterize the mechanical performance and to enable a comparison with respect to interesting parameters. Here, a strain rate-sensitive hardening behavior, compressibility and capability are observed. In contrast, the electrical charge level as a central property of operation shows a negligible influence. With regard to the direction of loading relative to the internal, laminar structure, the cells show significant differences in load capacity. Industrially standardized, increasing degrees of maturity of test objects of identical design correlate positively with the statistical measures of the characteristic values. Consequently, early prototypes are already suitable for analysis for design and, if necessary, homologation.

Due to the automotive application case, a homogenized substitute material is proposed to mimic the identified phenomena of plastic material behavior. By the analytical description of the experimental scenarios based on the principle of virtual work, constitutive functions for the description of the hardening are derived. These are implemented and parameterized in a finite element method based on the macroscopically incompressible behavior with a von Mises flow criterion. Artificial neural networks trained via a design of experiments are used as response surfaces for calibration. The comparison to the experimental results with a least squares method results in a parameter set that allows a prediction of the strain hardening as a measure of plastic dissipation with a correlation coefficient > 0.8 over five orders of magnitude of loading velocities. The proposed evaluation of the criticality of loads is performed by the virtual determination of strain and strain rate with subsequent comparison to the normalized intrusions and deformation velocities. In conclusion, it can be stated that the residual speeds occurring in crash situations when hitting the cells are too high to allow loading and deformation with sufficient safety in future vehicle concepts.

Within the scope of the dissertation, a continuous process for the systematic, experimental characterization of the dynamic properties of lithium-ion cells is developed and

Summary

implemented in a crash mechanical modeling approach for the finite element method. Using the so far unexplored prismatic cell format as an example, existing modelling approaches are partly confirmed and the state of the art is extended in particular by findings regarding the operating state, the dynamic behaviour and the technical maturation of the component.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	i
Kurzfassung	iii
Summary	v
I. Abkürzungsverzeichnis	ix
II. Symbolverzeichnis	xi
1. Einleitung	1
1.1. Problemstellung	3
1.2. Zielsetzung	3
1.3. Aufbau der Arbeit	4
2. Grundlagen und Stand der Technik	7
2.1. Lithium-Ionen-Zellen	7
2.1.1. Elektrochemische Funktionsweise	7
2.1.2. Physischer Aufbau	9
2.1.3. Industrialisierung und Formfaktoren	11
2.1.4. Thermisches Durchgehen	13
2.2. Methoden der statistischen Versuchsplanung	14
2.3. Untersuchungen des Deformationsverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen	17
2.4. Mechanische Materialmodellierung	20
2.4.1. Fließfunktion und -kriterium	21
2.4.2. Verfestigungsgesetz	22
2.4.3. Fließregel	23
2.5. Finite Elemente Methode	24
2.6. Ansätze zur mechanischen Modellierung von Lithium-Ionen-Zellen	26
2.7. Kernbotschaften zum Stand der Technik	29
3. Forschungsfragen	31
4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen	33
4.1. Erläuterung des experimentellen Aufbaus	33
4.1.1. Beschreibung der Prüflinge	33
4.1.2. Aufbau der Versuchsanlage und -szenarien	35
4.1.3. Sensorik und Ablauf der Messungen	38
4.2. Versuchsplanung	41
4.3. Auswertungsmethodik	43

4.4.	Ergebnisse	45
4.4.1.	Verfestigung	45
4.4.2.	Versagen	49
4.4.3.	Deformationsverhalten	52
4.5.	Interpretation und Diskussion	58
4.6.	Kernbotschaften zur experimentellen Studie	64
5.	Phänomenologisch basierte Modellierung des dynamischen Deformationsverhaltens	65
5.1.	Analytische Problemformulierung	65
5.1.1.	Prinzip der virtuellen Arbeit	65
5.1.2.	Anwendung auf den quasistatischen Lastfall	66
5.1.3.	Phänomenologische Ableitung des viskoplastischen Verfestigungsgesetzes	69
5.2.	Problemformulierung mittels der Finite-Elemente-Methode	70
5.2.1.	Finite-Elemente-Modelle der Experimente	71
5.2.2.	Hypothese zum Materialmodell	72
5.2.3.	Parametrisierung	73
5.2.4.	Validierung des parametrisierten Materialmodells	74
5.3.	Definition eines Versagenskriteriums	75
5.4.	Kernbotschaften zum Modellierungsansatz	78
6.	Anwendung des Modells in einer Gesamtfahrzeugsimulation	79
7.	Zusammenfassung	83
7.1.	Reflexion der angewandten Methodik	84
7.2.	Beantwortung der Forschungsfragen	85
7.3.	Reflexion der Zielerreichung	86
7.4.	Ausblick	87
III.	Abbildungsverzeichnis	89
IV.	Tabellenverzeichnis	93
V.	Literaturverzeichnis	95

I. Abkürzungsverzeichnis

aLHS	<i>advanced Latin Hypercube Sampling</i>
BEV	batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (engl. <i>battery electric vehicles</i>)
BMW	Bayerische Motoren Werke
CID	Stromunterbrechungssystem (engl. <i>current interuption device</i>)
DoD	Entladegrad (engl. <i>degree of discharge</i>)
DoE	Versuchsplan (engl. <i>design of experiments</i>)
EES	Elektrisches Energiespeichersystem
EV	Elektrofahrzeug (engl. <i>electric vehicle</i>)
FE	Finite-Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
HL	Gefährdungsklassen (engl. <i>hazard level</i>)
HVS	Hochvoltspeicher
KNN	künstliches neuronales Netz
LCO	Lithium-Kobalt-Oxid
LFP	Lithium-Eisen-Phosphat
LHS	<i>Latin Hypercube Sampling</i>
LMO	Lithium-Mangan-Oxid
NCA	Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid
NMC	Lithium-Nickel-Mangan-Oxid
NVH	Betriebsfestigkeit (engl. <i>noise and vibration harshness</i>)
OCV	Leerlaufspannung (engl. <i>open current voltage</i>)
OFAT	Einfaktorvariation (engl. <i>one factor at a time</i>)
DGL	Differenzialgleichung
PHEV	Plug-In Hybridfahrzeug (engl. <i>plug-in hybrid electric vehicle</i>)

I. Abkürzungsverzeichnis

PTC	Widerstände mit einem positiven Temperatur-Koeffizienten (engl. <i>positive temperature coefficient</i>)
RSM	Antwortflächenmethodik (engl. <i>responce surface methodology</i>)
RVE	repräsentatives Volumenelement
SoC	Ladegrad (engl. <i>state of charge</i>)
SEI	Festkörper-Elektrolyt-Grenzfläche (engl. <i>solid electrolyte interface</i>)
VDA	Verband der Automobilindustrie

II. Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
--------	---------	-------------

Matrix- und Vektorwertige Symbole:

σ	MPa	Spannungstensor
ε	-	Verzerrungstensor
B	N	Vektor extern wirkender Kräfte
C	N m^{-1}	Steifigkeitstensor
D	N s m^{-1}	Dämpfungstensor
M	kg	Massentensor
\mathfrak{P}	-	Parametersatz einer Antwortfläche
\mathfrak{P}_s	-	Parametersatz einer Antwortfläche
\mathfrak{P}_d	-	Parametersatz einer Antwortfläche
T	-	Hauptachsentransformationsmatrix
u	m	Verschiebungsvektor
\dot{u}	m s^{-1}	Geschwindigkeitsvektor
\ddot{u}	m s^{-2}	Beschleunigungsvektor
x_i	-	i-te Faktorkombination eines Versuchsplans

Griechische Symbole:

α	-	hydrostatischer Formfaktor für die Fließfläche nach Deshpande-Fleck
β	-	deviatorischer Formfaktor für das plastische Potential nach Deshpande-Fleck
ε	-	Dehnung
$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$	-	Hauptnormalverzerrungen
ε_t	-	absolute Dehnung
ε_e	-	elastische Dehnung
ε_p	-	plastische Dehnung
ε_{SP}	-	Dehnung am Schnittpunkte des Verfestigungsgesetzes
ε_p, \perp	-	Dehnung lateral zu Wickelstruktur
$\dot{\varepsilon}$	s^{-1}	absolute Dehnrates
$\dot{\varepsilon}_p$	s^{-1}	plastische Dehnrates
$\dot{\varepsilon}_0$	s^{-1}	(quasistatische) Referenzdehnrates
Θ	-	unbelegte Stelle im Wirtsgitter
λ	-	plastischer Multiplikator

II. Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
μ	-	Reibwert
ν_e	-	elastische Querkontraktionszahl
ν_p	-	plastische Querkontraktionszahl
ρ	kg m^{-3}	Dichte
ρ_0	kg m^{-3}	initiale Dichte
σ	MPa	mechanische Spannung
σ_0	MPa	initiale Fließspannung
σ_y	MPa	Fließspannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	MPa	Hauptnormalspannungen
τ	GPa	Schubspannung
ϕ	°	Öffnungswinkel der Fließfläche nach Drucker-Prager
φ	°	Winkel unter dem der Wendepunkt der approximierten Biegelinie gegenüber der Symmetrielinie auftritt

Lateinische Symbole:

A	-	Faktor des Verfestigungsgesetzes
B	-	Faktor der Verfestigungskurve
B_0	N	Ordinatenschnittpunkt der Trendlinie des Verfestigungsparameters B
B_1	N	Intrusionsratenabhängigkeit der Trendlinie des Verfestigungsparameters B
C	-	Faktor des dehnratenabhängigen Teils des Verfestigungsgesetzes
d	m	Deformationsweg der Intrusionsgeometrie
E	MPa	Elastizitätsmodul
E_{ALLKE}	J	kinetische Energien
E_{ALLFD}	J	über Reibung dissipierte Energien
E_{ALLAE}	J	künstliche Energien
E_{ALLSE}	J	elastisch gespeicherte Energien
E_{ALLPD}	J	plastisch dissipierte Energien
E_{ALLWK}	J	Arbeit extern wirkender Kräfte
ε_p, \perp	-	Dehnung lateral zu Wickelstruktur
f	-	Fließfunktion
\mathfrak{f}	-	Antwortfläche
f_i	-	Faktor im Versuchsplan
f_p	-	Porosität
F	N	Deformationskraft
F_0	N	Ordinatenschnittpunkt der Trendlinie des Versagensparameters F_c
F_1	N	Intrusionsratenabhängigkeit der Trendlinien des Versagensparameters F_c
$F_{\text{analytisch}}$	N	analytisch ermittelte Deformationskraft

Symbol	Einheit	Bezeichnung
F_{approx}	N	approximierte Deformationskraft
F_c	N	kritische Deformationskraft
F_{exp}	N	experimentell ermittelte Deformationskraft
F_{sim}	N	simulativ ermittelte Deformationskraft
\bar{F}_c	N	mittlere kritische Deformationskraft
g	-	plastisches Potential
h	-	Achse in Deformationsrichtung
$h(\varepsilon_p, \dots)$	-	Verfestigungsgesetz
H	mm	Abmessung der Höhe der prismatischen Zelle
I	-	Intrusion
i	-	arbiträre Zählvariable
I_0^*	-	Ordinatenschnittpunkt der Trendlinie des Versagensparameters I_c
$I_{0,S}, I_{0,U}$	-	Ordinatenschnittpunkt der verschobenen Trendlinie des Versagensparameters I_c
I_1	-	erste Invariante des Spannungstensors
$I_{1,S}, I_{1,U}$	-	Intrusionsratenabhängigkeit der Trendlinie des Versagensparameters I_c
I_c	-	kritische Intrusion
\bar{I}_c	-	mittlere kritische Intrusion
\dot{I}	s ⁻¹	Intrusionsrate
J_2	MPa	zweite Invariante des deviatorischen Spannungstensors
l	-	Achse lateral zur Deformationsrichtung aus der Zeichenebene
L	N	Abmessung der Länge der prismatischen Zelle
m	-	Exponent der Temperatursensitivität nach Johnson-Cook
M	MPa	Plastizitätsmodul
N	-	Gesamtzahl der Experimente
n	-	Exponent der Verfestigungskurve
n_0	-	quasistatischer Exponent der Verfestigungskurve
n_0, S, n_0, U	-	Ordinatenschnittpunkt der Trendlinie des Verfestigungsparameters n
n_1, S, n_1, U	-	Intrusionsratenabhängigkeit der Trendlinie des Verfestigungsparameters n
p	MPa	hydrostatischer Spannungsanteil
p_{c0}	MPa	initiale hydrostatische Fließgrenze auf Druckbeanspruchung
p_t	MPa	hydrostatische Fließgrenze auf Zugbeanspruchung
q	MPa	deviatorischer Spannungsanteil
r	-	Achse lateral zur Deformationsrichtung in der Zeichenebene
R	mm	Deformationsradius
R_α	mm	Radialer Abstand des Wendepunkts der approximierten Biegelinie
R_s	-	Risikoakzeptanzschwelle

II. Symbolverzeichnis

Symbol	Einheit	Bezeichnung
R^2	-	Bestimmtheitsmaß
s	-	Standardabweichung
S	m^2	Oberfläche
S_i	-	definierte Stufe eines Faktors
t	s	Zeit
T	mm	Dickenabmessung der prismatischen Zelle
T_0	$^{\circ}\text{C}$	Referenztemperatur
T_m	$^{\circ}\text{C}$	Schmelztemperatur nach Johnson-Cook
T^*	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
U	V	Zellspannung
V_f	m^3	freies Volumen innerhalb einer Zelle
V_d	m^3	deformiertes Volumen einer Zelle
V	m^3	Volumen
v_{sim}	m s^{-1}	Geschwindigkeitsrandbedingung der Zellsimulation
w	mm	lokale Deformationstiefe
x_i	-	i-ter Abszissenwert
y_i	-	i-ter Ordinatenwert
z	-	Kardinalität der Abszissen- und Ordinatenwertepaare

1. Einleitung

Im Bestreben Kraftstoffverbräuche und Emissionen zu verringern, widmen sich Automobilhersteller mit dem Ziel langfristig nachhaltiger Mobilität neben der Optimierung verbrennungsmotorischer Antriebskonzepte zunehmend der Entwicklung der Elektromobilität [1]. Elektrische Energiespeichersysteme (EES) mit Lithium-Ionen-Technologie in Kombination mit leistungsfähigen Elektromotoren stellen den derzeit stärksten Konkurrenten für Verbrennungsmotoren als automobiler Antriebstechnik dar [1–3]. Diese Speicher bestehen üblicherweise aus einer Vielzahl an Einzelzellen, die zunächst zu Zellmodulen assembliert und anschließend in unterschiedlicher Anzahl und Orientierung in den Batteriegehäusen arretiert werden. Nach elektrischer Verschaltung auf etwa 400 V entsteht ein sog. Hochvoltspeicher (HVS).

Derzeit verfügbare batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (engl. *battery electric vehicles*) (BEV) besitzen in der Regel jedoch deutlich geringere Reichweiten als gleichwertige Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben [1, 4]. Um dieses Defizit mittels einer Steigerung des Energieinhalts zu kompensieren, werden HVS signifikanter Abmessungen konzipiert, die weite Teile des Unterflurs der Fahrzeuge einnehmen.

Eine erfolgreiche Implementierung derartiger Batterien erfordert ihre Integration in die Strukturkonzepte der Karosserie von Elektrofahrzeugen (engl. *electric vehicles*) (EVs), da etablierte strukturelle Komponenten, wie bspw. der Fahrzeuglängsträger, bauraumbedingt durch die Batteriegehäuse substituiert werden oder diese in Teilen deren Funktionen übernehmen. Zur Bedeutung dieser Integration trägt weiter eine adäquate Verankerung im Fahrzeug bei. Diese ist notwendig, da die Speicher mit mehr als 25 % einen signifikanten Anteil des Fahrzeugleergewichts vereinnahmen (bspw. Audi eTron 27,3 %, Tesla Model S 28,4 % sowie Mercedes-Benz EQC 26,5 % [5–7]). Beide Aspekte unterstreichen den maßgeblichen Einfluss moderner HVS auf das mechanische Gesamtfahrzeugverhalten.

Folglich entfallen vormals in der Rohkarosserie verortete mechanische Funktionen zunehmend auf den HVS und dessen Gehäuse. Hervorzuheben ist hierbei die passive Sicherheit. Deren Ziele erweitern sich in diesem Zusammenhang - neben dem klassischen Insassenschutz - um den Schutz des energetischen Materials, da sich bei dessen Beschädigung Brände prinzipbedingt nicht ausschließen lassen. Das Sicherheitsniveau entspricht dennoch konventionell angetriebenen Fahrzeugen [8]. Abb. 1.1 (a) illustriert diese Entwicklung anhand eines BMW i3, dessen HVS im Crash-Fall vollständig vom restlichen Fahrzeug geschützt wird. Daneben ist eine übliche Speicheranordnung im Tankbereich und unter der zweiten Sitzreihe für ein Plug-In Hybridfahrzeug (engl. *plug-in hybrid electric vehicle*) (PHEV) dargestellt [2, 9], die zwischen den beiden in Abb. 1.1 (b) sichtbaren Hälften geringer Nachgiebigkeit über einen gezielten Deformationsbereich verfügt. Zuletzt zeigt Abb. 1.1 (c) ein strukturintegriertes Konzept. Allen Konzepten in Abb. 1.1 ist zudem die exponierte Lage auf der Fahrzeugunterseite gemein. Im Falle von Deformationen besteht ein zu beherrschendes Risiko, wie fatale Ereignisse mit EVs in jüngster Vergangenheit belegen [10, 11]. Limitierend ist in jedem Fall eine Belastung der zur Batterie aggregier-

1. Einleitung

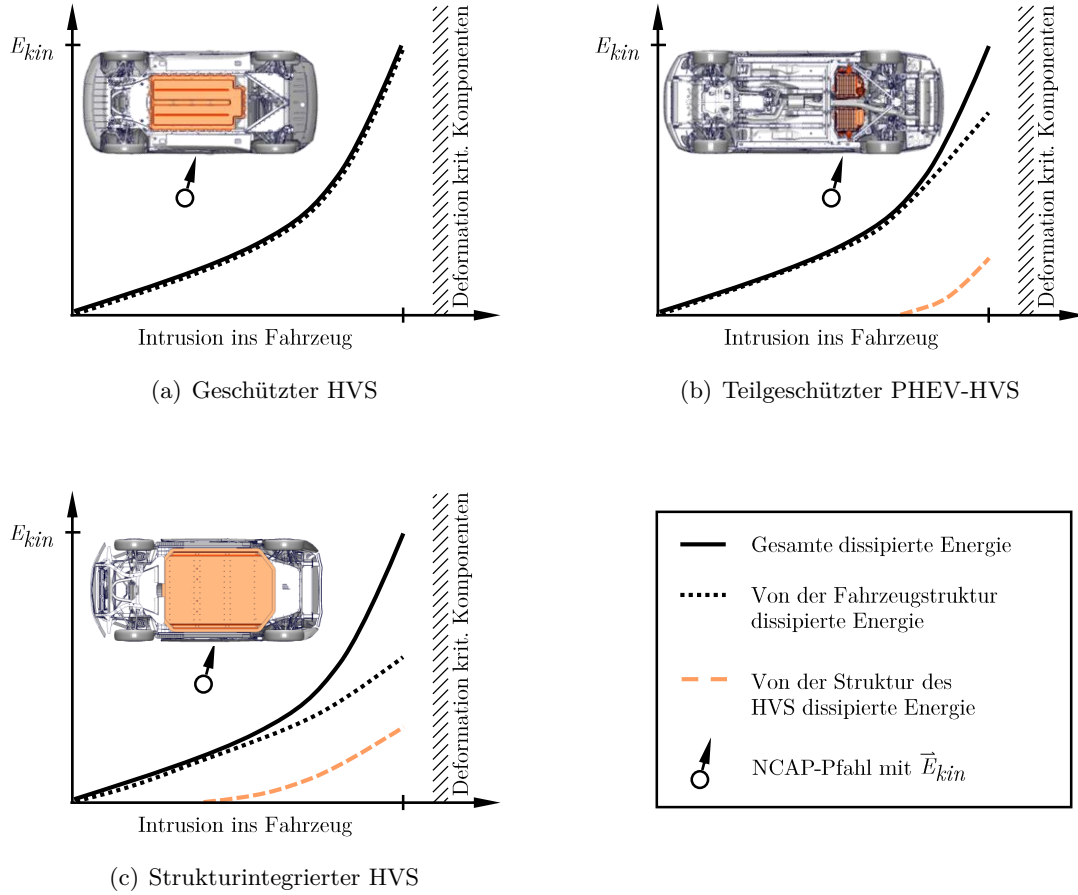


Abb. 1.1.: Schematische Dissipationsanteile passiver Sicherheitskonzepte für elektrifizierte Fahrzeuge im Falle eines EuroNCAP Car-to-Pole-Crashes mit 32 km h^{-1} auf Tank oder B-Säule.

ten Einzelzellen als kritische Komponente, da deren Defekt zu Kurzschlüssen und zu der o.g. möglichen exothermen Reaktion führt (=engl. *thermal runaway*, thermisches Durchgehen) [12].

Es ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen dem volumetrischen Anteil an strukturellen Bauteilen und Deformationsverhalten, die sich positiv auf die passive Sicherheit des HVS und Fahrzeugs auswirken, jedoch negativ zur volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte der HVS beitragen. Wenngleich die Gefährdungsvermeidung, sowohl von Insassen als auch anderer Verkehrsteilnehmer, in der Automobilindustrie höchste Priorität besitzt [8], ist die Balance zwischen Sicherheit und Reichweite ein entscheidendes Differenzierungsmerkmal im Wettbewerb.

1.1. Problemstellung

Für den skizzierten *Break-Even*-Punkt existiert - neben anderen Aspekten - die Unschärfe, dass das mechanische Deformationsverhalten und die Versagenskonditionen von Lithium-Ionen-Zellen weitgehend und hinsichtlich des im automobilen Bereich verbreiteten prismatischen Zellformats gänzlich unerforscht ist. Diesem wird üblicherweise Rechnung getragen, indem Zellen und Zellmodule in der Auslegung mit einer geometrischen Sicherheit deformationsfrei gehalten werden, siehe Abb. 1.1 [2, 12]. Es verbleibt die zentrale Fragestellung bezüglich der mechanischen Tragfähigkeit von Lithium-Ionen-Zellen, deren Kenntnis die Spezifikation einer ingenieurmäßigen Sicherheit bei gleichzeitiger Abwägung einer Reichweitenerhöhung erlaubt. Dabei gilt es jedoch multiphysikalische und multidisziplinäre Einflussfaktoren zu berücksichtigen.

Fahrzeug-Crashes stellen einen energetischen, hochdynamischen Prozess mit transienten Verformungsgeschwindigkeiten dar. Bei den in der Auslegung verwendeten Materialmodellen wird dies stets berücksichtigt.

Von zentraler Bedeutung für die Reaktivität im Falle eines thermischen Durchgehens ist der Ladegrad (engl. *state of charge*) (SoC) der Zellen [13, 14]. Mehrere Studien belegen eine Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften im Bereich der Dynamik und Betriebsfestigkeit [15–26]. Dies lässt einen Einfluss auf das mechanische Deformationsverhalten vermuten [4, 27].

Zusätzlich sind Aspekte der Produktentstehung zu berücksichtigen. Das Heranreifen und die Weiterentwicklung von Subkomponenten parallel zur Fahrzeugentwicklung birgt Unsicherheiten und stellt eine Herausforderung innerhalb des etablierten Standards des *Automotive Systems Engineering* dar [28]. Eine potentielle Veränderlichkeit in der mechanischen Performanz der Lithium-Ionen-Zellen muss bereits in frühen Phasen der Konzeptentwicklung eines Automobils adäquat berücksichtigt werden. Noch weiter greifende Prognosen werden benötigt, wenn die im Zuge der Modellpflege (= *Facelift*) von EVs üblichen Reichweitenerhöhungen durch eine Substitution mit Zellen der nächsten Generation und höherer Energiedichte vorgenommen werden.

1.2. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines durchgängigen Prozesses zur systematischen, experimentellen Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Lithium-Ionen-Zellen und deren Implementierung in eine crash-mechanische Modellierung für die Finite-Elemente-Methode (FEM).

Der Kern der Arbeit umfasst die Generierung eines experimentell fundierten Verständnisses für das Deformationsverhalten und die Belastungsgrenzen von prismatischen Lithium-Ionen-Zellen zur Schließung der existierenden Forschungslücke. Zur Wahrung der Belastbarkeit der Erkenntnisse ist ein Versuchsplan mit signifikanter Stichprobengröße und unter Berücksichtigung relevanter Randbedingungen zu erstellen und durchzuführen. Im speziellen sind die Auswirkungen des SoC, der Belastungsgeschwindigkeit, der Belastungsrichtung, des Entwicklungsstadiums der Komponente und die Überleitung zwischen Entwicklungsgenerationen auf die Rheologie der Zellen zu beurteilen.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Entwicklung eines phänomenologisch basier-

1. Einleitung

ten, mechanischen Materialmodells für Lithium-Ionen-Zellen. Hierbei sind die Randbedingungen üblicher Auslegungsmethoden der passiven Sicherheit einzuhalten. Die Validität ist anhand der Prognosegüte der experimentell gewonnenen Ergebnisse zu bestätigen.

Abschließend wird die Anwendbarkeit in der Fahrzeugauslegung nachgewiesen, wobei ein gravimetrisches und volumetrisches Potenzial in der Energiedichte von HVS bei Zulassen einer Zellbeaufschlagung in Abwägung des damit verbundenen Risikos quantifiziert wird.

1.3. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist, wie in Abb. 1.2 dargestellt, in die nachfolgende Teilbereiche unterteilt.

In Kapitel 2 werden zunächst die notwendigen Grundlagen bezüglich Lithium-Ionen-Zellen und statistischer Versuchsplanung dargestellt. Anschließend erfolgt eine Kategorisierung relevanter, experimenteller Publikationen. Nach der Darlegung mechanischer Modellierungskonzepte und einer Erläuterung der FEM wird der Stand der Technik zur mechanischen Modellierung von Lithium-Ionen-Zellen zusammengefasst.

Kapitel 3 stellt ermittelte Defizite im Stand der Technik und abgeleitete, zu beantwortenden Forschungsfragen im Kontext der Zielsetzung zusammen.

Zunächst werden in Kapitel 4 die im Rahmen der Arbeit analysierten Prüflinge und der experimentelle Aufbau detailliert erläutert. Der Konzeption des Versuchsplans folgt die Beschreibung der Datenakquise und -aufbereitung. Im Anschluss an die Darstellung und Beschreibung der Versuchsergebnisse erfolgt deren makrorheologische Interpretation.

Die phänomenologischen Erkenntnisse dienen der Ableitung geeigneter Materialmodelle in Kapitel 5. Die analytische Formulierung des quasistatischen Belastungsfalls bildet die Grundlage eines auf Materialebene parametrisierten Finite-Elemente (FE)-Modells, mit dem die dynamischen Eigenschaften analysiert werden. Auf Basis einer Parameterstudie wird ein Metamodell der Simulationsergebnisse generiert, das einen Abgleich mit den Versuchsergebnissen erlaubt und wodurch ein optimaler, mittlerer Parametersatz ermittelt wird. Die Validierung des parametrisierten Materialmodells erfolgt anhand der Prognosegüte gegenüber den Versuchsergebnissen. Abschließend wird ein probabilistischer Ansatz zur Beurteilung kritischer Beschädigung in Abhängigkeit von Dehnung und Dehnrate formuliert.

Das validierte Modell wird anschließend bezüglich seiner Anwendbarkeit in einer exemplarischen Gesamtfahrzeugsimulation in Kapitel 6 analysiert. Mittels des wahrscheinlichkeitsbasierten Ansatzes wird abschließend das gravimetrische und volumetrische Potenzial ausgewiesen.

Kapitel 7 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen. Der Beantwortung der Forschungsfragen und Überprüfung der Zielerreichung folgt ein Ausblick zur Weiterentwicklung der betrachteten Thematik.

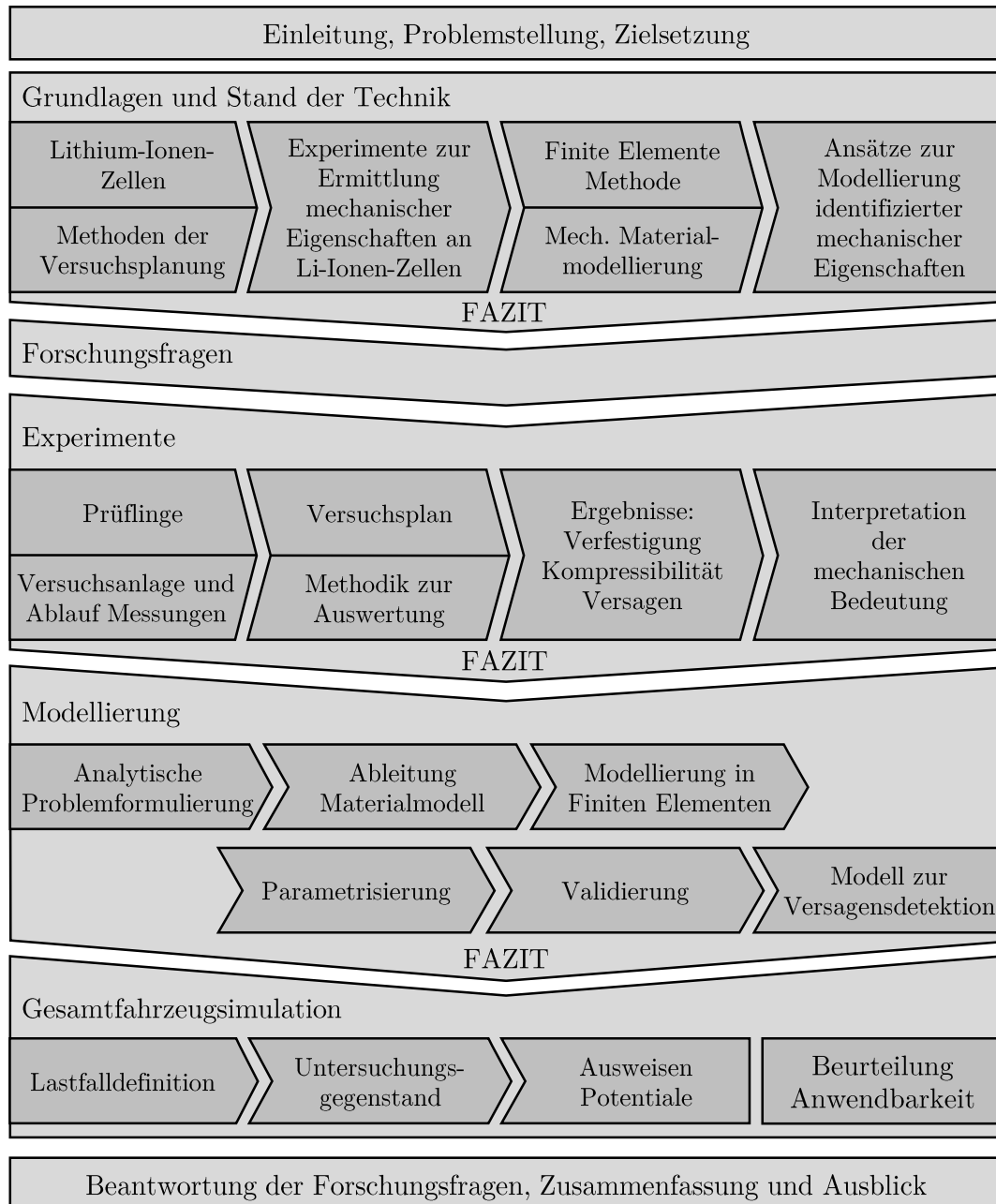


Abb. 1.2.: Visualisierte Struktur der Arbeit.

2. Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel stellt die relevanten Grundlagen über Lithium-Ionen-Zellen, deren Charakterisierung und Modellierung des Deformationsverhaltens dar.

Die Zellen werden zu Beginn auf der Mikroebene mit ihrer elektrochemischen Funktionsweise erläutert. Über den laminaren meso- bis makroskopischen Aufbau werden schließlich die prinzipiellen Herstellungsverfahren und Formate industrieller Zellen erläutert. Der Sicherheitsaspekt hinsichtlich exothermem Durchgehen der Zellen (engl. *thermal runaway*) rundet die Grundlagen ab. Nach der Erläuterung relevanter Auszüge aus der statistischen Versuchsplanung wird der existierende, experimentelle Stand der Technik bezüglich Deformation und dadurch induziertes Versagen von Lithium-Ionen-Zellen dargelegt.

Der zweite Teil befasst sich mit der Modellierung und beginnt mit den grundlegenden Beschreibungen (kontinuums-)mechanischen Materialverhaltens. Insbesondere bestimmte Aspekte der Viskoplastizität werden detailliert erläutert. Schließlich wird eine Übersicht über existierende Ansätze zur mechanischen FE-Modellierung von Lithium-Ionen-Zellen gegeben, teils basierend auf den zuvor vorgestellten experimentellen Erkenntnissen.

2.1. Lithium-Ionen-Zellen

Batterien mit Lithium-Ionen-Technologie stellen elektrochemische Energiespeicher basierend auf dem Wirkprinzip einer galvanischen Zelle dar, wobei das elektro-chemische Potenzial von Lithium in Form einer Reduktions-Oxidations-Reaktion ausgenutzt wird. Zentrale Bedeutung fällt der Technologie in vielfältigen Anwendungen im Konsumbereich sowie in jüngster Vergangenheit in diversen Mobilitätsbereichen zu [3].

Je nach Einsatz verfügen verschiedene Bauformen und enthaltene Zellchemien über eine unterschiedliche Eignung. Die bedeutendsten Charakteristika sind in Abb. 2.1 aufgetragen, anhand derer in Abschnitt 2.1.1 die gängigsten Kathodenmaterialien als zentraler Adaptionmechanismus gegenübergestellt werden.

2.1.1. Elektrochemische Funktionsweise

Das zugrundeliegende Funktionsprinzip einer Lithium-Ionen-Zelle stellt die Interkalation (lat. *intercalare*, einschieben) und Diffusion von Lithium-Ionen in ein Wirtsgitter dar. Getrieben von einem Gradienten im elektrochemischen Potenzial lagern sich Lithium-Ionen in die als Wirtsgitter dienenden Elektroden ein oder aus [29–32]. An diesen findet eine Reaktion nach dem folgenden Muster statt:



Θ ist hierin als unbelegte und $\text{Li}\Theta$ als besetzte Stelle im Wirtsgitter zu interpretieren. Der Eingliederungsmodus wird durch die verwendeten Elektrodenmaterialien und -

2. Grundlagen und Stand der Technik

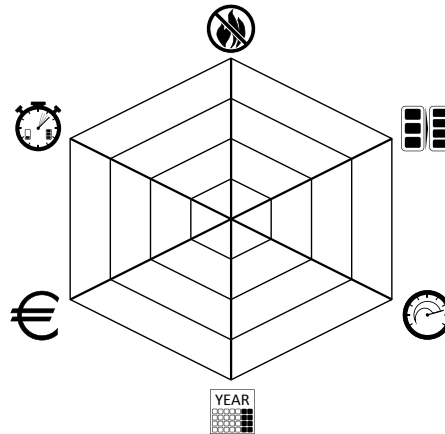


Abb. 2.1.: Zentrale Benchmark-Charakteristika bezüglich automobiler Anwendungen, beginnend von oben, im Uhrzeigersinn: Sicherheit, gravimetrische Energie- und Leistungsdichte, Alterungsverhalten, spezifische Kosten und Schnellladefähigkeit [1].

Tab. 2.1.: Kommerzielle Alternativen für Kobaltoxid [1].

Verbindung	Akronym	Strukturformel
Lithium-Kobalt-Oxid	LCO	LiCoO_2
Lithium-Mangan-Oxid	LMO	LiMn_2O_4
Lithium-Nickel-Mangan-Oxid	NMC	$\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$
Lithium-Nickel-Kobalt-Aluminium-Oxid	NCA	$\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$
Lithium-Eisen-Phosphat	LFP	LiFePO_4

molekülstrukturen bestimmt und determiniert die Performanz der Zelle, wie beispielsweise die Spannungslage, die Leistungsfähigkeit und das Alterungsverhalten [29, 33].

Als Anode wird im Folgenden die negative Elektrode bezeichnet, die positive als Kathode. Diese Definition ist nur für das Entladen formal korrekt und entstammt den lediglich entladend betreibbaren Lithium-Primärzellen. Die Anode fungiert in diesem Fall als Elektronendonator (Oxidation), während die Kathode als Elektronenakzeptor dient (Reduktion) [29, 34].

Das meistverwendete Anodenmaterial stellt Graphit dar, welches sich durch die schichtweise Anordnung der Kohlenstoffatome auszeichnet. Während des Ladens der Zelle werden die Lithium-Ionen zwischen diese Graphitschichten eingelagert [8, 35].

Die jeweiligen Charakteristika der Kathodenmaterialien ermöglichen eine anforderungskonforme Individualisierung der Zellen. Das gebräuchlichste Material stellt Kobalt-oxid dar, wobei die bedeutendsten kommerziellen Alternativen in Tab. 2.1 aufgeführt sind. Abb. 2.2 stellt diese Materialien bezüglich der in Abb. 2.1 aufgeführten Eigenschaften gegenüber.

Neben den Aktivmaterialien in ihrer Grundkonfiguration gemäß Tab. 2.1 werden die Werkstoffsysteme durch alternative molekulare Zusammensetzungen individualisiert. Bei-

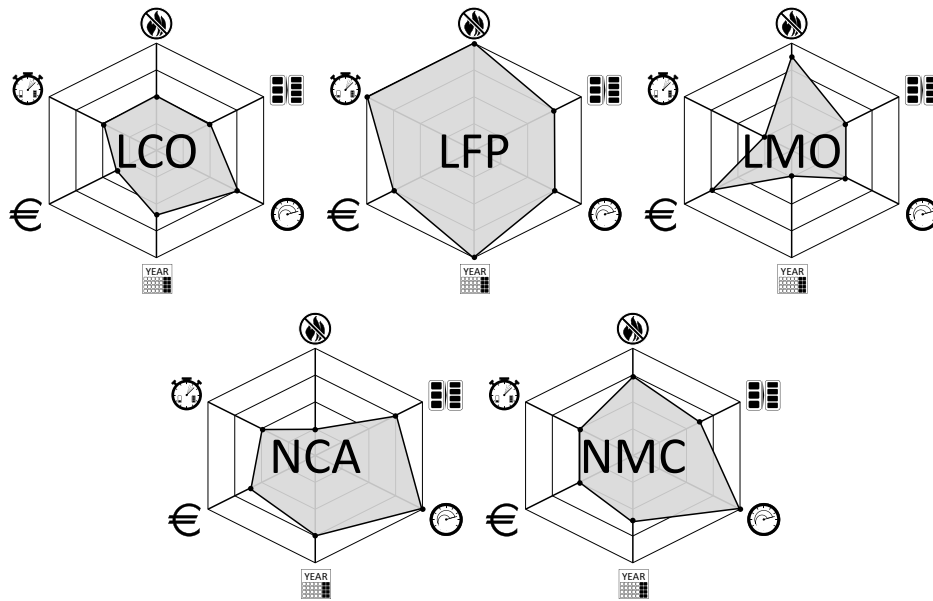


Abb. 2.2.: Vergleich kommerzieller Kathodenmaterialien, angelehnt an [1].

spielsweise werden im Verbindungssystem NMC einerseits aus Gründen der Performanz, aber auch monetär und verfügbareitsmotiviert die Zusammensetzungen in Relation zu Lithium verändert. Die Bezeichnung der resultierenden Systeme folgt beispielsweise der Logik $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ mit $x+y+z = 100\%$, sodass sich erweiterte Akronyme als Konvention etablierten. Als Beispiel sei NMC-1-1-1 gemäß Tab. 2.1 angeführt. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Zellen mit Graphit als Anode und kathodenseitig NMC-1-1-1 sowie einer nickelreicheren Weiterentwicklung höherer Energiedichte betrachtet.

2.1.2. Physischer Aufbau

Der mesoskopisch laminare Aufbau von Lithium-Ionen-Zellen ist in Abb. 2.3 dargestellt. Eine Minimalzelle besteht aus zwei porösen Elektroden und einem porösen Separator dazwischen, die von einem Elektrolyten durchtränkt werden [1, 31, 36, 37].

Zur Erzeugung der Elektroden werden zunächst zwei Trägerfolien mit einem dispergierten Komposit beschichtet. Neben chemischer Beständigkeit sollten sich die Werkstoffe der Folien durch eine hohe Leitfähigkeit auszeichnen [29, 38, 39]. Kathodenseitig wird häufig Aluminiumfolie von 15 bis 25 μm Dicke und anodenseitig Kupferfolie von 6 bis 18 μm Dicke eingesetzt [40].

Das Komposit besteht primär aus den pulverförmigen Partikeln der erwähnten Anoden- und Kathodenmaterialien. Weiterhin wird üblicherweise Polyvinylidendifluorid als Bindemittel beigemischt, um eine gute Adhäsion gegenüber den Folien und mechanische Integrität durch interpartikuläre Kohäsion zu gewährleisten. Als Leitzusatz wird häufig Ruß beigefügt. An dieser Stelle soll jedoch nicht auf weiterführende Additive wie Lösungsmittel eingegangen werden [38, 39].

Abschließend werden die Schichten getrocknet, beim Kalandrieren (franz. calandre = Rolle) sukzessive auf die anvisierte Beschichtungsstärke gewalzt und somit auch die Po-

2. Grundlagen und Stand der Technik

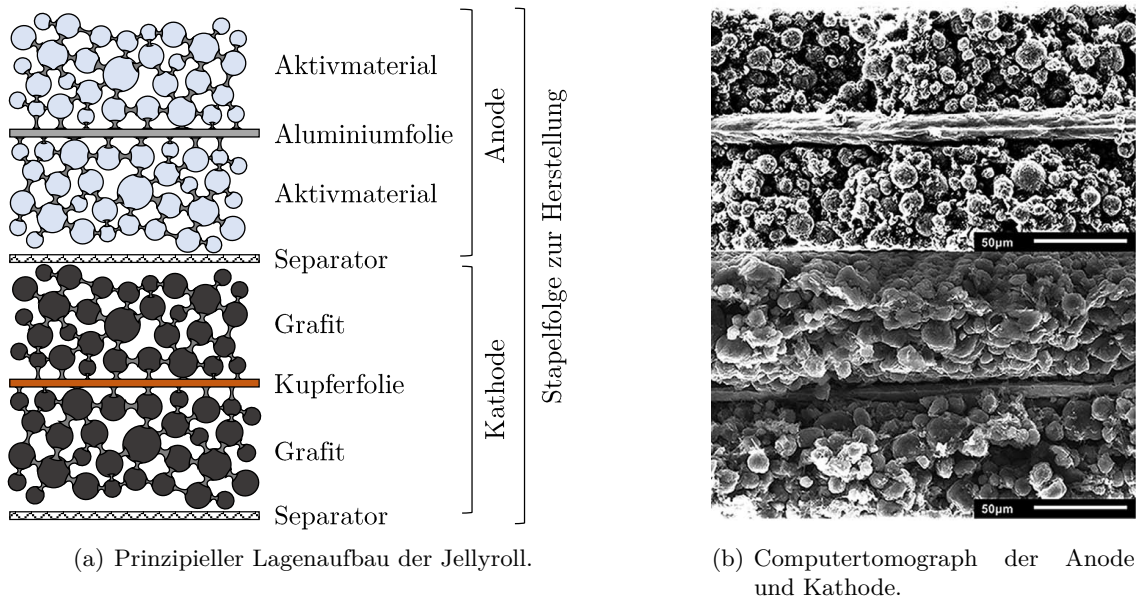


Abb. 2.3.: Laminare Struktur des physischen Aufbaus einer Lithium-Ionen-Zelle.

rosität eingestellt. Die Dimension der Aktivmaterialschicht bestimmt die Kapazität der späteren Zelle maßgeblich [33]. Es resultiert eine geometrisch komplexe, inhomogen poröse Struktur aus Partikeln unterschiedlicher Form und Dimension [41, 42]. Hierdurch wird die zur Interkalation zur Verfügung stehende spezifische Oberfläche vergrößert und somit wirkt sich die Porosität insbesondere auf die Leistungsdichte aus [29, 35].

Zwischen die beiden beschichteten Elektroden wird zur elektrischen Isolation ein Separator aus einer strukturierten, mikroporösen Polymermembran eingebracht. Diese semi-permeable Schicht lässt Lithium-Ionen im Betrieb passieren und erzwingt eine Elektronenbewegung über einen Leitpfad durch die Partikelstruktur und Trägerfolien, um einen Ladungsausgleich zu ermöglichen. Da die Leitfähigkeiten der üblichen Elektrolyte etwa 10 mS cm^{-1} betragen, sind die Elektroden durch dünne Separatoren mit 15 bis $30 \mu\text{m}$ möglichst dicht beisammen anzuordnen. Hierdurch minimiert sich der Widerstand, wobei die Folien gleichzeitig weniger Sicherheit vor Perforationen und daraus resultierenden Kurzschlüssen bieten [12].

Zur Steigerung der Energiedichte, werden in handelsüblichen Zellen die Elektrodenfolien in der Regel beidseitig beschichtet und eine weitere Separatorlage eingebracht. So entsteht durch multiple Wiederholung der Stapelfolge Kathode, Separator, Anode, Separator der mesoskopische Aufbau des Zellinneren, wie in Abb. 2.3 in einmaliger Sequenz skizziert.

Zur leitfähigen Formung des galvanischen Elements wird das poröse Laminat abschließend mit einem organischen Elektrolyten durchtränkt. Dieser wird aus einer Lösung von Lithiumsalzen und Carbonaten hergestellt [31, 37]. Weitere Additive dienen Zwecken der Lebensdauer- und Sicherheitsoptimierung [43].

Lithiiertes Grafit besitzt ein Potenzial deutlich außerhalb des Stabilitätsfensters der gängigen Elektrolyte [37], sodass sich beim initialen Laden eine schützende Schicht durch die Reaktion mit dem Elektrolyten an den Grenzflächen der Elektroden bildet [29, 33]. Diese

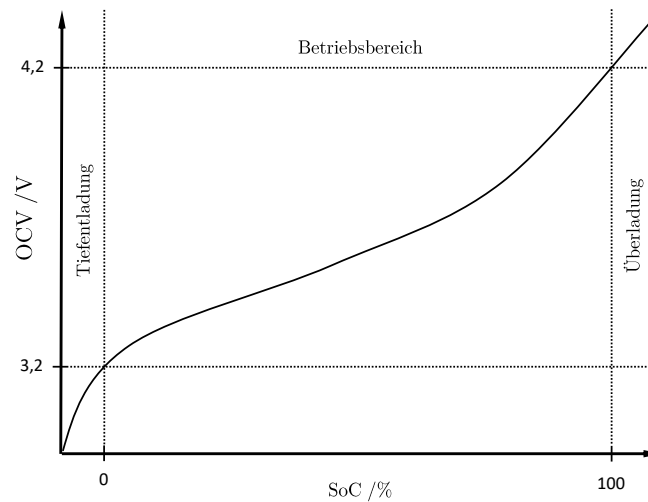


Abb. 2.4.: Exemplarische OCV-Kurve zur Ermittlung und Einstellung des Ladegrads einer Li-Ionen-Zelle mit NMC-Chemie.

wird Festkörper-Elektrolyt-Grenzfläche (engl. *solid electrolyte interface*) (SEI) genannt [1] und deren kontrollierte Ausbildung im Rahmen der Fertigung wird Formierung genannt. Prinzipiell entsteht dadurch ein reversibles, stabiles System, wenngleich diese Reaktionen weiterhin während des Betriebs stattfinden. Die Effektivität dieser Schutzhülle hat signifikante Auswirkung auf sowohl die zyklische als auch die kalendarische Lebensdauer [1].

Um die SEI optimal auszubilden und im Betrieb Zyklenfestigkeit sicherzustellen, ist die Kenntnis der Kennlinie der Leerlaufspannung (engl. *open current voltage*) (OCV) des Systems aus Kathoden- und Anodenmaterial sowie Elektrolyt vonnöten. Eine exemplarische OCV Kurve ist in Abb. 2.4 dargestellt. Hierin ist der nicht-lineare Zusammenhang zwischen dem SoC und OCV dargestellt, wobei eine zeitliche Abhängigkeit aufgrund Konzentrationsgradienten in den Elektroden vernachlässigt wird. Werden Zellen außerhalb des Betriebsfensters bemessen am Entladegrad (engl. *degree of discharge*) (DoD) betrieben, werden die Zellen übermäßig und irreversibel geschädigt. Üblicherweise beträgt der DoD von Lithium-Ionen-Zellen etwa 60 – 90 % der Nennkapazität. Die Ladegrade 0 % und 100 % der im Rahmen dieser Arbeit analysierten Zellen wurden mithilfe der spezifischen OCV-Kennlinien eingestellt.

2.1.3. Industrialisierung und Formfaktoren

Durch das alternierende Übereinanderlegen von Elektrodenblättern oder Wickeln von Quasi-Endlosfolien entstehen die sog. *Stacks* oder *Jellyrolls*, die das Innere der Zellen darstellen. Letztere sind entweder rund oder elliptisch ausgeprägt. Die Wahl des Fertigungsverfahrens hängt primär von der geometrischen, äußeren Form des zu fertigenden, industriellen Zellformats ab. Die sich fertigungsbedingt ergebende Form des Zellinneren lässt sich unterschiedlich volumetrisch effizient in die jeweiligen Gehäuseformen integrieren. Die etablierten Zellformate sind prinzipiell in Abb. 2.5 dargestellt. Pouchzellen zeichnen sich durch ein flaches Design und die charakteristische *Coffeebag* bestehend aus einer tiefgezo-

2. Grundlagen und Stand der Technik

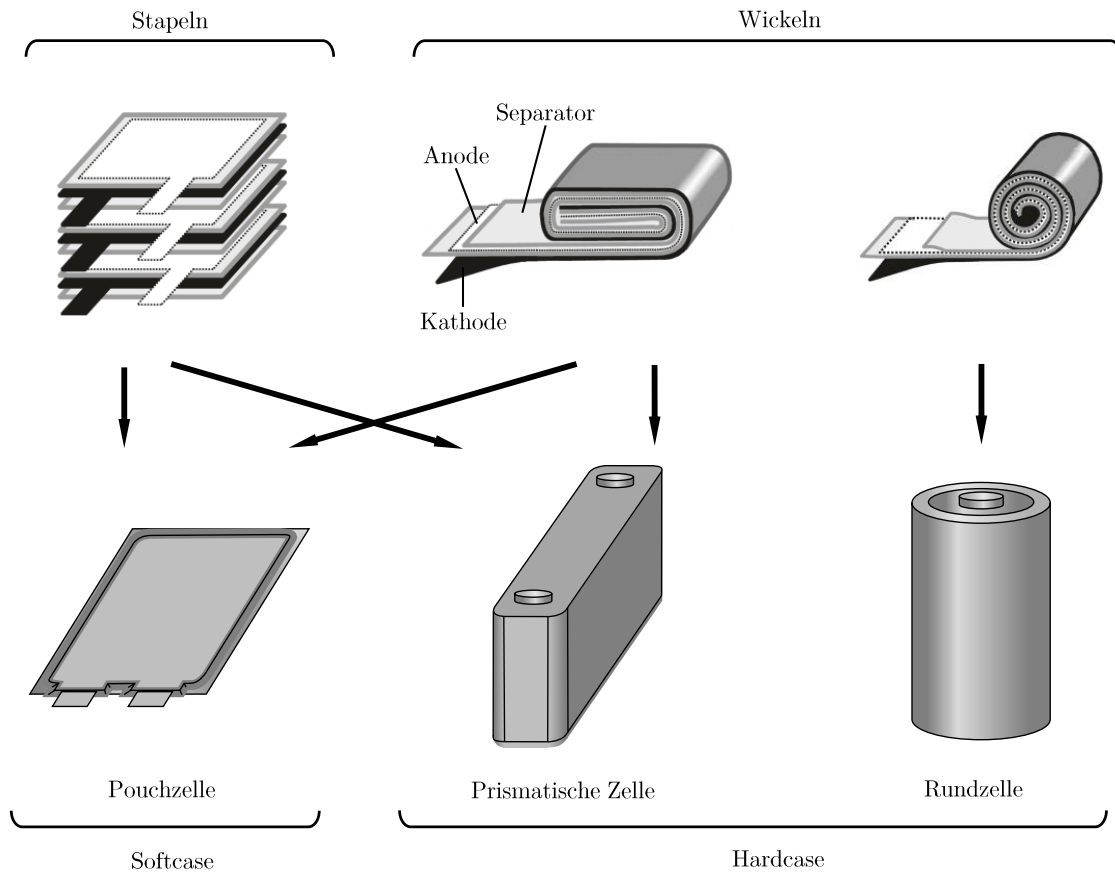


Abb. 2.5.: Handelsübliche Formate von Lithium-Ionen-Zellen, angelehnt an [33].

genen Kunststoff-, Aluminium- oder Kunststoffverbundfolie aus [33]. Bei den prismatischen oder den zylindrischen Zellen besteht das Gehäuse aus tiefgezogenem oder fließgepresstem Aluminium- oder (Edel-)Stahl.

Die beschriebenen Formfaktoren sind in beliebigen Abmessungen herstellbar und ermöglichen so die Skalierung des Energieinhalts einer Zelle in Kombination mit der bereits erläuterten Wahl der Zellchemie, der Schichtdicke sowie über die Oberfläche des enthaltenen, elektrochemischen Elements.

Zylindrische Zellen werden üblicherweise mit kreisrunden *Jellyrolls* befüllt. Bei Pouchzellen bieten sich *Stacks* an; dies ist jedoch aufgrund Aspekten der Fertigung nicht zwangsläufig optimal. Prismatische Zellen enthalten eine oder mehrere *Jellyrolls* in elliptischer Ausprägung und Wickelrichtung entlang der Hoch- oder Längsachse der Zelle. Zur Erreichung eines maximalen volumetrischen Nutzungsgrads existieren auch prismatische Zellen mit gestapeltem Inhalt. Die elliptische Zelle stellt eine Untergattung der prismatischen Zelle dar. Sie verfügt ebenfalls über Gehäuse aus Blech, wobei dieses nicht quaderförmig ausgeprägt ist, sondern die schmalen Seiten halbzylinderförmig gestaltet sind und somit die Form der darin enthaltenen *Jellyroll* nachempfinden.

Vor dem Einbringen in die metallischen Gehäuse werden die aus den *Jellyrolls* hervorste-

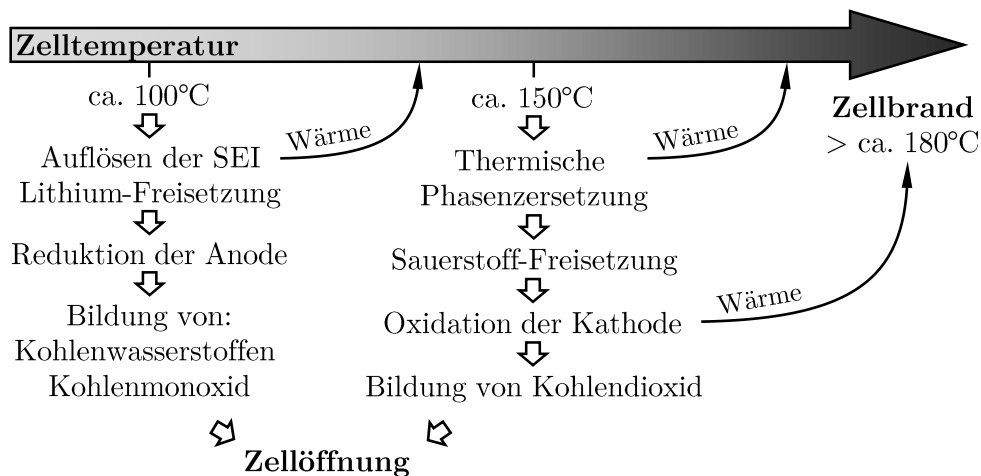


Abb. 2.6.: Chemische Zusammenhänge und Abfolge des exothermen Durchgehens von Li-Ionen-Zellen, in Anlehnung an [13].

henden Ableiterfolien meist per Ultraschall- oder Laserschweißen mit den Stromableitern verbunden. Abschließend werden alle Zelltypen mit einer luftdichten Siegelnaht verschlossen und der Elektrolyt eingefüllt.

Das metallische, mechanisch tragfähige Gehäuse macht es zugleich möglich und erforderlich, dass bei prismatischen und zylindrischen Zellen Sicherheitseinrichtungen eingebracht werden. Zu diesen gehört ein Stromunterbrechungssystem (engl. *current interruption device*)s (CIDs), das die Zelle elektrisch auskoppelt, sobald bestimmte Innendrucke erreicht sind. Zudem werden Widerstände mit einem positiven Temperatur-Koeffizienten (engl. *positive temperature coefficient*) (PTC) zur Limitierung der Stromstärke bei steigenden Temperaturen eingesetzt. Im Falle eines thermischen Durchgehens schützt zudem ein Berstventil die Zelle bei Überdruck vor einer Explosion [31, 44].

2.1.4. Thermisches Durchgehen

Thermisches Durchgehen (engl. *thermal runaway*) ist als exotherme Kettenreaktion definiert, bei der die Eigenerwärmungsrate einer Batteriezelle mehr als $0.2^\circ\text{C min}^{-1}$ beträgt [44, 45]. Dieser Vorgang kann durch verschiedene Fehlermodi eingeleitet werden. Externe Kurzschlüsse, Zersetzungsreaktion durch Überladen, Herstellungsfehler oder mechanische Beschädigungen können zellintern zu Kurzschlüssen führen, die durch den sich daraus ergebenden hohen Stromfluss zur Erwärmung der Zelle führen [14]. Besonders problematisch ist, dass sich diese Fehlerfälle ohne äußere Energiezufuhr zu signifikanten Gefährdungsszenarien entwickeln können. Deren Kategorisierung erfolgt anhand der EUCAR-/FreedomCAR-Gefährdungsklassen (engl. *hazard level*) (HL). Beginnend mit der vollständigen Integrität der Zelle (HL0), Auslösen von Sicherheitseinrichtungen (HL1), reparabler Defekte (HL2) über Ausgasen (HL3-HL4), Brand (HL5), Materialauswurf (HL6) und Explosion (HL7) werden die Ergebnisse phänomenologisch nach aufsteigender Kritikalität klassifiziert [46, 47].

Abb. 2.6 skizziert den Ablauf eines thermischen Durchgehens anhand der stattfindenden

2. Grundlagen und Stand der Technik

Reaktionen und temperaturabhängiger Folgereaktionen. Bei Temperaturen oberhalb von etwa 100 °C lösen sich die SEI und die Anode auf, wobei Kohlenwasserstoffe entstehen. Erreicht die Zelle Temperaturen über 150 °C folgt die Zersetzung der Kathode, wodurch der gebundene Sauerstoff frei wird (vgl. Tab. 2.1). Meist entstehen hohe Drücke, denen die Zellgehäuse nicht standhalten, sodass es zur Zellöffnung und Entgasung kommt. Die entweichenden Reaktionsprodukte stellen ein zündfähiges Gemisch dar, das in Folge zu Zellbränden führen kann [33].

Zur Beurteilung internationaler Transportanforderungen sind Lithium-Ionen-Zellen einer Vielzahl von Tests zu unterziehen, bei denen jeweils die Gefährdungsklasse HL2 (reparable Defekte) als Maximalgrenze für das Bestehen des Tests festgelegt ist [48, 49]. Darüber hinaus ist für die Erfüllung gesetzlicher Homologations- und Verbraucherschutzanforderungen für Fahrzeuge und folglich auch für verbaute Batterien und Zellen im Crashfall die maximale Gefährdungsklasse HL4 (Ausgasen) zulässig [46, 47, 49].

Da Hochtemperaturereignisse ab Gefährdungsklasse HL5 (Brand) im Sinne der Homologationsnachweise nicht zulässig sind, werden diese hier nicht weiter analysiert. In dieser Arbeit wird entsprechend ausschließlich das mechanische Verhalten von Zellen behandelt, die noch nicht einen fortan sogenannten kritischen Zustand eingegangen sind.

2.2. Methoden der statistischen Versuchsplanung

Experimentelle Studien unter beherrschten Bedingungen ermöglichen gesicherte Erkenntnisgewinne über reale Prozesse und Systeme [50]. Das Vorgehen gliedert sich in die Versuchsplanung, die Datenerhebung, die deskriptive Statistik und die induktive Auswertung. Eine sachgerechte Versuchsplanung setzt voraus, alle Einfluss- und mögliche Störfaktoren der Beobachtungsgrößen so zu erfassen, zu definieren und zu kombinieren, dass der Versuchsfehler minimiert wird. Störfaktoren müssen unter statistische Kontrolle gebracht werden, damit Reproduzierbarkeit und Interpretierbarkeit gewährleistet und eine Versuchsverzerrung ausgeschlossen werden kann. Alle interessierenden Einflussfaktoren werden möglichst kontrolliert und unabhängig voneinander in den relevanten Bereichen variiert, damit deren Auswirkung auf die Zielgrößen beobachtet werden kann. Unter Primärvariation versteht man, die systematische Variation der Zielgröße aufgrund von interessierenden Faktoren. Sekundärvariation wird systematisch durch Störfaktoren sowie explizit nicht interessierende Faktoren hervorgerufen. Unsystematische Variationen durch nicht-identifizierte Störfaktoren werden als Fehlervariationen bezeichnet. Die Einordnung in Primär- und Sekundärvariation ergibt sich aus der Festlegung der interessierenden Faktoren während der Versuchsplanung. Für die Maximierung der Primärvariation ist es zielführend, die Intervalle der interessierenden Faktoren so groß wie möglich zu wählen. Die Primärvariation lässt sich durch die Untersuchung einer hohen Zahl von Ausprägungen präzisieren. Sekundär- und Fehlervariation können durch Maßnahmen wie Eliminierung, Konstanthaltung, Umwandlung in Einflussfaktoren, Randomisierung und Wiederholungsmessungen minimiert werden. Antagonistische oder synergetische Interaktionen der Faktoren können die Differenzierung erschweren. Kann der Effekt einer Faktorvariation nicht mehr vom Effekt eines anderen Faktors unterschieden werden, spricht man vom zu vermeidenden *Confounding* (engl., im Sinne von Durcheinanderbringen). Die Auswirkungen von Interaktionen lassen sich durch eine Einfaktorvariation (engl. *one factor at a time*) (OFAT) minimieren, bei

der die Primärvariation dem jeweilig variierten Faktor direkt zugeordnet wird [50, 51].

Die Ausprägungen eines Faktors werden als Stufen bezeichnet und sind den folgenden, steigenden Skalenniveaus zuzuordnen:

1. Nominalskala: Keine Anordnung auf einer Dimension.
2. Ordinalskala: Rangreihung auf einer Dimension, über Abstände zwischen benachbarten Urteilklassen ist nichts ausgesagt.
3. Intervallskala: Ordnung auf einer Dimension möglich; die Abstände zwischen den Skalenpunkten sind gleich.
4. Verhältnisskala: Intervallskala mit einem festen, nicht willkürlichen Nullpunkt. Verhältnisse sind sinnvoll.

Folglich unterscheiden sich die Skalenniveaus im Hinblick auf ihre Messung, erlaubte Operationen und Interpretation. Eine verwandte Einteilung erfolgt hinsichtlich einer qualitativen Merkmalsausprägung, bei der die Variable im Gegensatz zur quantitativen Ausprägung höchstens ordinalskalierte Eigenschaften bezeichnet. Quantitative oder metrische Merkmalsausprägungen zeichnen sich durch mindestens intervallskalierte und messbare Stufen aus, wobei hier weiterhin nach diskreten und stetigen Variablen unterschieden wird. Die Festlegung der Faktoren auf ihren Skalen erfolgt als *fixed factor*, womit die Ausprägungen definierte, wiederholbare Stufen darstellen oder als *random factor*, womit die Ausprägungen zufällige Stufen annehmen [50, 51].

Die statistische Versuchsplanung ist eine Erweiterung dieses Vorgehens, mit dem die sinnvolle Interpretierbarkeit maximiert und der Aufwand minimiert werden soll [50].

Ein vollfaktorieller Versuchsplan entsteht indem alle definierten Stufen S aller Faktoren f_i miteinander kombiniert werden (vgl. Abb. 2.7(a)). Die Anzahl N der durchzuführenden experimentellen Faktorkombinationen \mathbf{x}_i ermittelt sich zu

$$N = \prod_{i=1}^{f_i} S_i. \quad (2.2)$$

Als teilfaktoriell bezeichnet man Versuchspläne, die eine Untermenge des vollfaktoriellen Designs enthalten. Der reduzierte Satz an Faktorkombinationen wird anhand von definierten Auswahlwahlmustern/-algorithmen bestimmt. Hierbei wird die Anzahl N meist vorgegeben, da zur Verfügung stehende Kapazitäten und Ressourcen in der Regel begrenzt sind. Abb. 2.7 (a) bis (e) zeigt geläufige Methoden zur Erzeugung von Versuchsplänen und stellt am Beispiel von zwei Parametern die jeweilige Abdeckung des Parameterraums dar. Die Verfahren unterscheiden sich darin, ob Parameterstufen mehrfach vorkommen, wodurch die Gefahr der Kumulation von Stufenkombinationen in einem Teilbereich des Parameterraums besteht. Zudem ist die Erzeugung der Versuchspläne unterschiedlich aufwändig.

Beim *Monte-Carlo*-Versuchsplan werden die Stufenkombinationen zufällig gewählt (Ziehen mit Zurücklegen). Weitere Verfahren berücksichtigen, welche Stufenkombinationen im Versuchsplan bereits vorliegen und ermitteln die folgenden sukzessiv. Das *Latin Hypercube Sampling* (LHS) unterteilt zunächst alle Skalen in N -Stufen und kombiniert diese anschließend derart, dass die Ausprägungen der Stufen nur einmal im gesamten Design vorkommen (Ziehen ohne Zurücklegen). Als *Max.-Min.*-Methode wird das Ermitteln der nächsten

2. Grundlagen und Stand der Technik

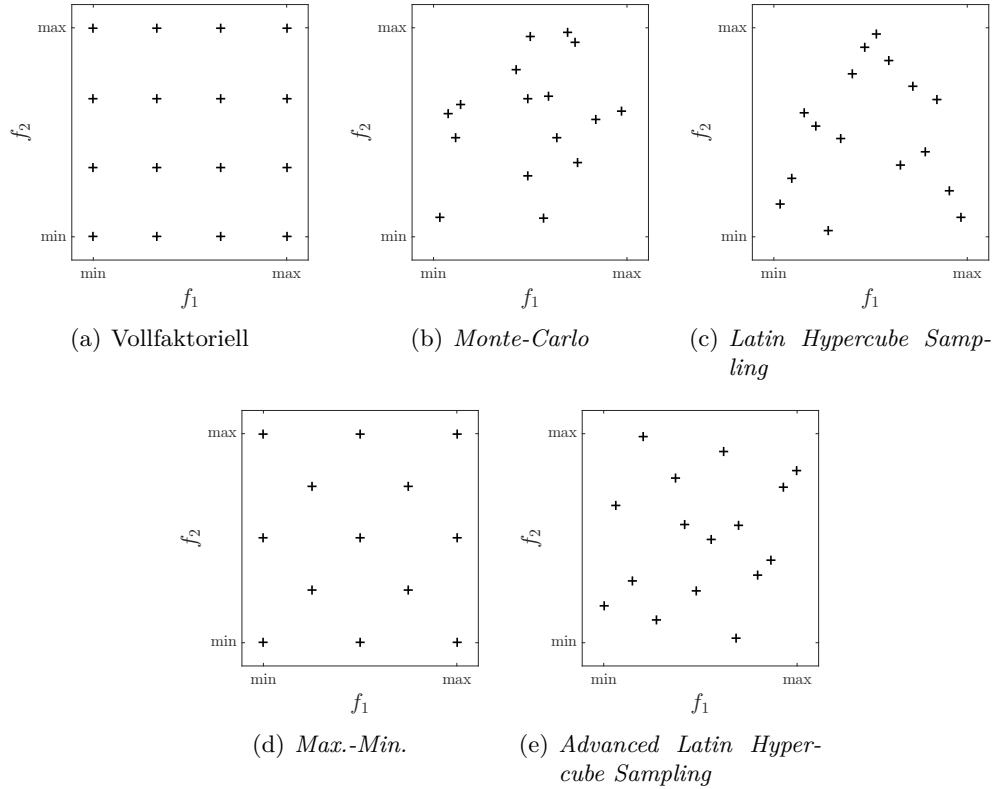


Abb. 2.7.: Exemplarische Versuchspläne mit zwei Variationsgrößen.

Kombination über die Maximierung des minimalen Abstands zu allen bereits vorliegenden Kombinationen verstanden. Geometrisch füllen Kugeln gleicher, zunehmender Radien den Parameterraum, wobei deren Mittelpunkte an den vorliegenden Stufenkombinationen liegen. Der in jeder Iteration zuletzt außerhalb der Kugeln befindliche (infinitesimale) Punkt stellt die nächste Stufenkombination dar. Beim *advanced Latin Hypercube Sampling* (aLHS) werden die Stufen analog LHS diskret ermittelt und die Kombinationen nach dem *Max.-Min.*-Algorithmus gewählt. Durch diesen zweistufigen Ansatz wird das Defizit ausgeglichen, dass beim regulären LHS eine Diagonale durch den Parameterraum einen validen Versuchsplan mit vergleichsweise schlechter Abdeckung darstellt.

Die Antwortflächenmethodik (engl. *responce surface methodology*) (RSM) dient zur Modellierung der Relation zwischen Einflussfaktoren und Ergebnisgröße. Hierbei wird die Systemantwort mittels beliebiger Funktionen \hat{f} approximiert, wobei die festgelegten Einflussgrößen \mathbf{x}_i die eingehenden Variablen darstellen. Mehrdimensionalen Polynome beliebiger Ordnung stellen die gebräuchlichste Approximationsart dar, wobei auch ein künstliches neuronales Netz (KNN) oder lokale lineare Modelle eingesetzt werden. In diesen funktionalen Beschreibungen ist ein Parametersatz \mathfrak{P} enthalten, mithilfe dessen eine Abweichung zwischen den prognostizierten Werten $\hat{f}(\mathbf{x}_i, \mathfrak{P})$ und der experimentell ermittelten Zielgröße y_i minimiert werden. Dieser Vorgang wird *Fitting* (engl., im Sinne von aneinander angleichen) genannt und stellt eine Optimierungsmethode dar, bei der beispielsweise die Summe der Fehlerquadrate minimiert wird:

2.3. Untersuchungen des Deformationsverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen

$$\min_{\mathfrak{P}} \sum_{i=1}^N [\mathfrak{f}(x_i, \mathfrak{P}) - y_i]^2 \quad (2.3)$$

Zur Beurteilung der Prognosegüte der Modellfunktion $\mathfrak{f}(\mathfrak{P})$ dient der Korrelationskoeffizient R . Mittels Gl. (2.4) wird das Bestimmtheitsmaß R^2 der Wertepaare $\mathfrak{f}(x_i, \mathfrak{P})$ und y_i ermittelt. z bezeichnet hierin die Kardinalität der Menge aller Wertepaare x_i und y_i .

$$R^2 = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^z (\mathfrak{f}(x_i, \mathfrak{P}) - y_i)^2}{\sum_{i=1}^z y_i^2} \right) \cdot 100 \% \quad (2.4)$$

2.3. Untersuchungen des Deformationsverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen

Das Deformationsverhalten von Lithium-Ionen-Zellen mit Fokus auf die mechanischen Eigenschaften des Zellinneren wird seit dem Jahr 2012 in mehreren Studien untersucht. Tab. 2.2 fasst publizierte experimentelle Untersuchungen des Deformationsverhaltens verschiedener Li-Ionen-Zellen zusammen. Hierbei stellen das anhand von Kraft-Weg-Kurven bestimmte Verfestigungsverhalten, die visuell beurteilte Kompressibilität und das Versagen zentrale Beobachtungspunkte dar [4, 27]. Das deformationsinduzierte Versagen der laminaren Struktur, insbesondere die Perforation des isolierenden Separators, wird stets durch ein signifikantes Abfallen der Zellspannung festgestellt. Die zugehörige Versagenskonfiguration wird durch die zu diesem Zeitpunkt erreichte Intrusion und dazu notwendiger Deformationskraft beschrieben.























































Die Gliederung von Tab. 2.2 ist an den Formfaktoren gemäß Abschnitt 2.1.3 und Kathodenmaterialien analog Abschnitt 2.1.1 ausgerichtet. Bislang beschränken sich die Untersuchungen auf die Formfaktoren elliptisch, Pouch und zylindrisch. Hinsichtlich der Kathodenmaterialien ist fest zu stellen, dass alle wesentlichen Materialien bereits analysiert wurden.

Experimente an den in der Automobilindustrie weit verbreiteten prismatischen Zellen fehlen vollständig [4, 27]. Zur Verbesserung der Vergleichbarkeit sind die Experimente an prismatischen Zellen, die Gegenstand dieser Arbeit sind und in Kapitel 4 detailliert dargestellt werden, in der letzten Zeile von Tab. 2.2 angefügt.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal stellt der Zustand der Zellen dar. Obwohl aktive Zellen mit signifikantem Ladegrad den wahrscheinlichsten Zustand im Feld darstellen [66], beschränken sich die Experimente meist aus Sicherheitsgründen auf inaktive Zellen ohne Elektrolytbefüllung oder entladene Zellen, sodass die Auswirkungen thermischer Ereignisse möglichst gering ausfallen oder ausbleiben. Es wird hier nicht weiter unterteilt, ob die Zellen tief entladen wurden oder einen SoC von 0 % aufweisen (vgl. OCV-Kennlinie Abb. 2.4). Die Analyse ungeladener und inaktiver Zellen birgt die Möglichkeit detaillierter post-mortem Analysen, da die Prüflinge anders als im Falle eines thermischen Ereignisses in der Regel nicht weitgehend zerstört werden. Dadurch wurde bei lagenparalleler Deformation ein kinematisch komplexes Verhalten identifiziert, bei dem sich die Lagen nach einem ersten Knicken ineinander verschlingen [59–62]. Ergebnisse aktiver Zellen unterscheiden sich im mechanischen Verhalten zu deren Äquivalent ohne Elektrolyten [65]. So

2. Grundlagen und Stand der Technik












Tab. 2.2.: Publierte experimentelle Studien zur Charakterisierung des mechanischen Materialverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen.

Formfaktor	Kathode	Zustand	Szenario	N	$\sim \dot{I} / \text{s}^{-1}$	
	NCA			5	$4 \cdot 10^{-3}$	[52]
	NCA			1	$1.8 \cdot 10^{2(1)}$	[52]
	NCA			6	10^{-3}	[53]
	NCA			10	10^{-3}	[54]
	LCO			3	10^{-2}	[55]
	LCO			3	$5 \cdot 10^{-3}$	[56, 57]
	LCO			15	$2 \cdot 10^{2(1)}$	[56, 57]
	NCA			9	10^{-2}	[22]
	LCO			7	10^{-3}	[58]
	LFP			11	$5 \cdot 10^{-4}$	[59–62]
	NCA			12	$3 \cdot 10^{-2}$	[63]
	NMC			12	$2 \cdot 10^{-2}$	[63]
	Nanophosphate ⁽³⁾			12	$2 \cdot 10^{-2}$	[63]
	NCA			6	10^{-2}	[64]
	NMC			15	$10^{-3} - 10^3$	[65]
	NCO			11	$10^{-3} - 10^3$	[65]
	NCO			9	$10^{-3} - 10^3$	[65]
	NMC			312	$10^{-3} - 10^3$	[66]

⁽¹⁾ Initialgeschwindigkeit mit Fallturmexperiment, transiente Deformationsrate.

⁽²⁾ Variierendende Intrusionsgeometrien.

⁽³⁾ Nicht näher spezifiziert.

	Zylindrische Zelle		Pouchzelle
	Elliptische Zelle		Prismatische Zelle
	Zelle ohne Elektrolytbefüllung		Tiefentladen bzw. 0% SoC
	Signifikant von 0% verschiedener SoC		
	Planare Kompression		Lokale Intrusion
	Drei-Punkt-Biegeversuch		Wickelparallel Intrusion

2.3. Untersuchungen des Deformationsverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen

benötigen inaktive Zellen im quasistatischen Bereich deutlich geringere Kräfte zur Erzeugung identischer Intrusionen wohingegen im dynamischen Bereich höhere Kräfte vonnöten sind. Der Einfluss des SoC wird unterschiedlich interpretiert. Einerseits werden signifikante Abhängigkeiten des Ladegrads auf die Verfestigung festgestellt [22, 56, 57] und andererseits insignifikante Auswirkungen konstatiert [67]. Bezüglich der Versagenskondition stellen sich ebenfalls widersprüchliche Ergebnisse ein. Bei zylindrischen Zellen werden höhere Lasten bei inaktiven Zellen benötigt, wohingegen bei elliptischen Zellen dieser Zusammenhang umgekehrt ist. Insgesamt lässt sich folglich keine eindeutige Auswirkung des Ladezustands feststellen.

Aufgrund des laminaren inneren Aufbaus der Zellen (Abschnitt 2.1.3) findet weiterhin eine Differenzierung anhand der Belastungsmodi und -szenarien statt. Die dargestellten Szenarien bilden idealisierte, mögliche Deformationsfälle nach, bei denen die Zellen entweder parallel oder lateral zum laminaren Aufbau des Zellinneren belastet werden. Bei lateralen Deformationsexperimenten wird die Zelle mit kugelförmigen oder zylindrischen Geometrien lokal intrudiert. Daneben werden die Zellen vollflächig planar komprimiert und klassischen Dreipunktbiegeversuchen mit zylinderförmigen Lagerpunkten unterzogen. Beim parallelen Belastungsfall erfolgt die Kompression mit zylindrischen oder planaren Geometrien. Drei Versuchsreihen beschäftigen sich bislang mit den mechanischen Eigenschaften bei lagenparalleler Belastung, wobei keine geometrisch identischen Intrusionskörper bezüglich der lateralen Richtung eingesetzt wurden. Da die Geometrien ungleich sind, lassen sich mögliche orthotrope Eigenschaften nur über die erarbeiteten Materialmodelle identifizieren, siehe hierzu Abschnitt 2.6.

Generell basieren die Ergebnisse auf relativ kleinen Stichprobenzahlen N und in der Regel werden Singulärversuche je Kombination interessierender Einflussfaktoren durchgeführt.

Abschließend werden in Tab. 2.2 die untersuchten Intrusionsraten \dot{I} zusammengestellt, die als anhand der signifikanten Zellabmessung (=in Deformationsrichtung) normierte Deformationsgeschwindigkeit definiert wird. Werte von $\dot{I} \leq 10^{-2} \text{s}^{-1}$ sind als quasistatische Deformationen zu klassifizieren, da die Zelldurchmesser oder -dicken 6 bis 60 mm betragen oder im Fall von wickelparalleler Belastung die Zellhöhe weniger als 10 cm misst. Beinahe allen Studien liegen quasistatische Deformationsgeschwindigkeiten zu Grunde mit entsprechend geringen Intrusionsraten \dot{I} . Drei Veröffentlichungen haben dynamische Experimenten zum Gegenstand [52, 56, 65]. Es wird stets ein nicht vernachlässigbarer Einfluss der Deformationsgeschwindigkeit festgestellt. Dabei stellen sich Sensitivitäten hinsichtlich unterschiedlicher Belastungsrichtungen und -szenarien heraus. So zeigen Pouch-Zellen eine dehnratenabhängige Verfestigung und elliptische Zellen eine Entfestigung trotz identischer Belastungsszenarien [65]. Mit der Ausnahme von Kisters et al. [65] wurden Fallturmversuche eingesetzt, um das dynamische Verhalten zu messen. Dieser Versuchsaufbau besitzt jedoch eine inhärente Abhängigkeit von Deformationsrate und plastischer Dissipation. Die Extraktion von präzisen Dehnratenabhängigkeiten gestaltet sich dadurch kompliziert.

Teilweise werden die Kraft-Weg-Kurven in den Veröffentlichungen approximiert. Diese beschreiben die Deformationskraft F stets in Form einer progressiven, exponentiellen Beschreibung in Abhängigkeit des Deformationswegs d :

$$F(d) = Bd^n \quad \text{mit} \quad B > 0, n > 1 \quad (2.5)$$

2. Grundlagen und Stand der Technik

Analog zur Belastungsrichtung haben Formfaktoren und Dimensionen der Prüflinge einen entscheidenden Einfluss auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Dementsprechend wird Abschnitt 2.6 eine detaillierte Analyse anhand der entsprechenden Ansatzfunktionen auf Materialebene vollzogen.

Annahmen zur Kompressibilität der Zellen basieren auf der Kompaktierung der porösen Struktur der aktiven Materialien der Elektroden und dem Separator. Bei quasistatischen Szenarien lässt sich beobachten, dass trotz signifikanter Deformationen eine unwesentliche seitliche Ausdehnung erfolgt. Auf dieser Basis wird eine Analogie zu metallischen Schäumen gezogen [53, 54, 56, 60, 63, 64, 68]. In den Untersuchungen mit höheren Geschwindigkeiten wird über das volumetrische Verhalten nicht berichtet, auch wenn Fluid-Festkörpermechanische Interaktionen zwischen der porösen Matrix und dem flüssigen Elektrolyten zu erwarten sind [4].

2.4. Mechanische Materialmodellierung

In der Mechanik wird grundsätzlich elastisches und unelastisches oder plastisches Materialverhalten differenziert. Gl. (2.6) stellt die Dekomposition des absoluten Dehnungszustands ε_t in eine elastische Verzerrung ε_e und eine plastische Verformung ε_p dar.

$$\varepsilon_t = \varepsilon_e + \varepsilon_p \quad (2.6)$$

Die Elastizität beschreibt skleronome Phänomene, wobei Verzerrungen in direkter Relation zur Belastung stehen, sodass bei vollständiger Entlastung der betrachtete Körper in den spannungslosen Ausgangszustand zurückkehrt. Die aufgewendete Verformungsarbeit wird folglich vollständig reversibel in Verzerrungsenergie transformiert. Der Spannungszustand σ ermittelt sich im linear elastischen Bereich gemäß dem Hooke'schen Gesetz in Gl. (2.7) aus dem Produkt eines Steifigkeitstensors C und dem Dehnungszustand ε_e [69, 70].

$$\sigma = C \cdot \varepsilon \quad (2.7)$$

Mittels einer Hauptachsentransformation T kann σ in eine Form gebracht werden, in der sich die Schubspannungen $\tau = 0$ ergeben und lediglich die orthogonalen Hauptnormalspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 als Matrixeinträge verbleiben. Der Verzerrungstensor ergibt sich analog.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{bmatrix} \xrightarrow{T} \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \xrightarrow{T} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Der Elastizitätstensor C bestimmt sich im Fall isotroper Medien aus dem materialspezifischen Elastizitätsmodul E und der elastischen Querkontraktionszahl ν_e (=Poissonzahl). Gl. (2.10) definiert ν_e als negativen Quotienten einer transversalen Dehnung und einer verursachenden axialen Dehnung [71–74].

$$\nu_e = -\frac{d\varepsilon_2}{d\varepsilon_1} = -\frac{d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1}, \quad \nu_e \in]-1, 0, 5[\quad (2.10)$$

Die Plastizität erweitert diese Betrachtungsweise einerseits um nicht-reversible Dissipationsmechanismen, die sich im Statischen skleronom beschreiben lassen. Zum anderen werden rheonome, viskoplastische Effekte behandelt [69, 70, 73]. Im Folgenden wird aufgrund der Themenstellung nur auf kurzzeit-dynamische Aspekte der Viskoplastizität eingegangen.

2.4.1. Fließfunktion und -kriterium

Die Unterscheidung der elastischen und plastischen Domäne findet mittels einer Fließfunktion $f(\boldsymbol{\sigma}, \dots)$ statt. Die Fließfunktion f setzt den momentanen Spannungszustand $\boldsymbol{\sigma}$ in Relation zu material- und modellspezifischen Fließkonditionen [71]. Definitionsgemäß führen negative Werte für f zu elastischem Verhalten, wogegen bei positiven Werten die Gesetzmäßigkeiten der Plastizität angewendet werden. Geometrische Repräsentationen der Fließkriterien mit $f = 0$ stellen die sogenannten Fließflächen F dar.

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \dots) \begin{cases} < 0 \text{ Elastisches Materialverhalten} \\ = 0 \text{ Spannungszustand liegt auf Fließfläche} \\ > 0 \text{ Plastifizierung gemäß Verfestigungsgesetz und Fließregel} \end{cases} \quad (2.11)$$

Eine komfortable Notation von Fließkriterien isotroper Materialien stellt die Beschreibung mittels der ersten Invarianten I_1 von $\boldsymbol{\sigma}$ und der zweiten Invarianten des Deviatorensors J_2 dar. Hierzu ermitteln sich gemäß Gl. (2.12) p als hydrostatischer und q als deviatorischer Anteil (=Von-Mises-Vergleichsspannung) des Spannungszustands $\boldsymbol{\sigma}$.

$$f(p, q, \dots) \text{ mit } \begin{cases} p = -\frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma}) & = I_1 \\ q = \frac{1}{2} \left[\text{tr}(\boldsymbol{\sigma}^2) - \frac{1}{3} \text{tr}(\boldsymbol{\sigma})^2 \right] & = J_2 \end{cases} \quad (2.12)$$

Gl. (2.13) bis Gl. (2.16) stellen die zur Modellierung von Li-Ionen-Zellen benutzten Fließkriterien zusammen.

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \dots) = \begin{cases} q - \sigma_y & (2.13) \\ \sigma_y + \phi \cdot p & (2.14) \end{cases}$$

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \dots) = \begin{cases} \sqrt{q^2 + \alpha^2 \left(p - \frac{p_{c0} - p_t}{2} \right)^2} - \alpha \frac{p_{c0} + p_t}{2} & (2.15) \end{cases}$$

$$f(\boldsymbol{\sigma}, \dots) = \begin{cases} \left(\frac{q}{\sigma_y} \right)^2 + 2f \cosh \left(\frac{1}{2} \frac{p}{\sigma_y} \right) - 1 - f_p^2 & (2.16) \end{cases}$$

Gl. (2.13) stellt mit dem Von-Mises-Kriterium die geläufigste Fließbedingung für metallische Werkstoffe dar und besitzt eine Formulierung, die nur deviatorische Spannungen berücksichtigt. Drucker-Prager formulierten eine Abhängigkeit der Fließbedingung von

2. Grundlagen und Stand der Technik

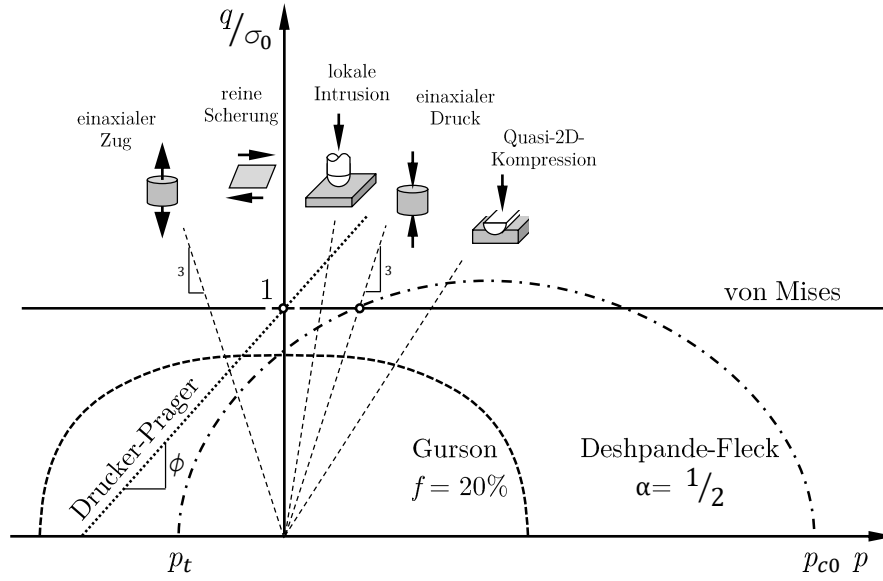


Abb. 2.8.: Ausgewählte initiale Fließflächen für $f(\sigma) = 0$ im Haigh-Westergaard Spannungsraum mit etwaigen Spannungszuständen aus prinzipiellen Belastungsszenarien, in Anlehnung an [4].

der hydrostatischen Spannung, die die Fließspannung mit einem Proportionalitätsfaktor ϕ zu p korreliert, bis zu einem Punkte negativer, hydrostatischer Spannungen an dem die Tragfähigkeit gleich null ist [75]. Das Modell wurde ursprünglich zur Modellierung von Bodenbeschaffenheiten entwickelt und findet darüber hinaus Anwendung bei der Modellierung von Stein, Beton, Polymeren und Schäumen. Deshpande-Fleck (Gl. (2.15)) und Gurson (Gl. (2.16)) entwickelten Modelle für poröse polymere oder metallische Materialien [76, 77], die in der Lage sind, verringerte Fließkonditionen zugleich bei negativen und positiven hydrostatischen Spannungen infolge der Porosität f_p nachzubilden.

Das Verhältnis α der p - zu q -Halbachsen der Ellipse ist abhängig von der hydrostatischen Fließspannung auf Druck p_{c0} und der durch einaxiale Kompression ermittelten, initialen Fließspannung σ_0 .

Abb. 2.8 zeigt die Fließflächen der Kriterien in Gl. (2.13) bis Gl. (2.16) im zweidimensionalen Haigh-Westergaard Raum. Für die Darstellung wurden alle Fließflächen für nicht plastifizierte Materialien mit der für Form und Größe maßgeblichen initialen Fließspannung $\sigma_0 = \sigma_y (\varepsilon_p = 0)$ ermittelt und die q -Achse darauf normiert.

2.4.2. Verfestigungsgesetz

Mit Ausnahme der idealen Plastizität nach der weiter unten aufgeführten Gl. (2.17) ändern sich mit fortschreitender Plastifizierung die Fließbedingungen und somit Größe und Form der Fließflächen. Dieses Phänomen wird mit einem Verfestigungsgesetz $\sigma_y(\sigma_0, \varepsilon_p, \dots)$ beschrieben, üblicherweise anhand einer initialen Fließbedingung σ_0 , der plastischen Dehnung ε_p und relevanter weiterer Zustandsgrößen, beispielsweise der Temperatur T^* . Berücksichtigt man Effekte der Dehnrates $\dot{\varepsilon}_p$, spricht man von Viskoplastizität.

Häufig werden einfache Modelle, wie eine lineare Korrelation mittels Plastizitätsmodul M gemäß Gl. (2.18) oder eine exponentielle Ludwik-Verfestigung nach Gl. (2.19) zur Beschreibung plastischen Materialverhaltens eingesetzt [78]. Die meistverwendete viskoplastische Formulierung ist die Johnson-Cook-Formulierung Gl. (2.20) [79]. Es existiert eine Vielzahl weiterer nicht-linearer Beschreibungen, sodass an dieser Stelle lediglich ein Überblick über geläufige Formulierungen gegeben wird, die üblicherweise additive oder multiplikative Dehnratenabhängigkeiten aufweisen. Seltener eingesetzte Formulierungen wurden von Steinberg-Cochran-Guinan-Lund (Gl. (2.21)), Zerilli-Armstrong (Gl. (2.22)) und Follansbee-Kocks (Gl. (2.23)) [80, 81] formuliert. Gl. (2.20) bis Gl. (2.22) enthalten explizit entsprechende dehnratenabhängige Terme, wohingegen in Gl. (2.23) S_i und S_e die entsprechenden Abhängigkeiten in Form eines reziproken Logarithmus enthalten. Auf die weiteren Materialparameter wird im späteren Verlauf der Arbeit bei Bedarf eingegangen.

$$\sigma_y(\sigma_0, \varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T^*, \dots) = \begin{cases} \sigma_0 = \text{const.} & (2.17) \\ M\sigma_0 & (2.18) \\ \sigma_0 + B\varepsilon_p^n & (2.19) \\ (A + B\varepsilon_p^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}_p}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left[1 - \left(\frac{T^* - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right] & (2.20) \\ [\sigma_0 h(\varepsilon_p) + \sigma_t(\dot{\varepsilon}_p, T^*)] \frac{\mu(p, T^*)}{\mu_0} & (2.21) \\ \sigma_0 + B e^{-\beta T^*} + B_0 \sqrt{\dot{\varepsilon}_p} e^{-\alpha_T T^*} & (2.22) \\ \sigma_0 + (S_i \sigma_i + S_e \sigma_e) \frac{\mu(p, T^*)}{\mu_0} & (2.23) \end{cases}$$

2.4.3. Fließregel

Die Fließregel nach Gl. (2.24) definiert die Entwicklung des plastischen Dehnungszustands $\dot{\varepsilon}_p$ häufig als partielle Ableitung des plastischen Potentials g nach dem Spannungszustand σ multipliziert mit einem plastischen Multiplikator $\dot{\lambda}$ [82].

$$\dot{\varepsilon}_p = \dot{\lambda} \frac{\partial g}{\partial \sigma} \quad (2.24)$$

Der plastische Multiplikator $\dot{\lambda}$ stellt hierbei das positive, skalarwertige Maß des Dehnungsinkrements dar und ist zu den Verfestigungsgesetzen des zugrundeliegenden Materials korreliert.

Man unterscheidet zwischen assoziativem und nicht-assoziativem Fließen. Ersteres wird auch Normalitätsregel genannt, da das Inkrement der plastischen Dehnung normal zur Fließfläche assoziiert ist. Die Fließfunktion f substituiert in diesem Fall das plastische Potential g in Gl. (2.24).

Inkompressibles Fließen ist unabhängig vom hydrostatischen Spannungsanteil, sodass $g = q$ gilt. Modelle für metallische Werkstoffe verwenden in der Regel eine assoziative Fließregel in Verbindung mit einem Fließkriterium nach von Mises. So entsteht ein Plastizitätsmodell, das inkompressibel und bezüglich des Fließens ausschließlich sensitiv für Deviatoren-Spannungen ist. In der Werkstoffkunde repräsentiert dies das Gleiten von Versetzungen in metallischen Kristallstrukturen.

2. Grundlagen und Stand der Technik

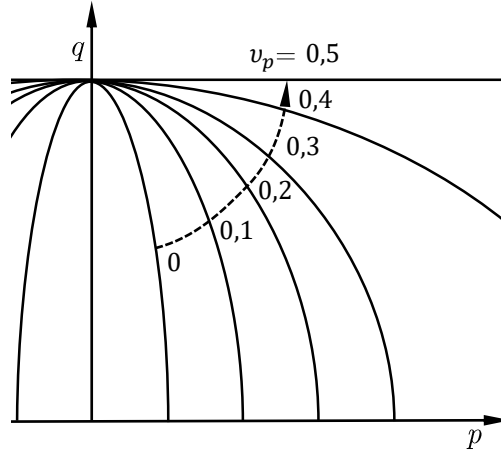


Abb. 2.9.: Visualisierung der Abhängigkeit des plastischen Potentials gemäß Gl. (2.25) and Gl. (2.26).

Für kompressible, beispielsweise poröse, Materialien bieten nicht-assoziative Fließregeln die Möglichkeit eine Volumenänderung zu modellieren. Aufgrund der häufigen Verwendung zur mechanischen Modellierung von Lithium-Ionen-Zellen wird dieser Zusammenhang anhand der isotrop und volumetrisch verfestigenden *Crushable Foam*-Modelle nach Deshpande-Fleck erläutert. Gl. (2.15) beschreibt die elliptische Fließfunktion und -fläche, wohingegen das plastische Potenzial gemäß Gl. (2.25), aber eine davon verschiedene ebenfalls elliptische Form annimmt.

$$g = \sqrt{q^2 + \beta p^2} \quad (2.25)$$

Im Falle isotroper Verfestigung ermöglicht β eine Anpassung der Kompressibilität und bestimmt sich aus der plastischen Querkontraktionszahl ν_p . Inkompressibilität ($\nu_p = 0,5$) wird mit $\beta = 0$ dargestellt und folglich wird $g = q$. Somit finden Deformationen ausschließlich in deviatorischer Spannungsrichtung statt.

$$\beta = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1 - 2\nu_p}{1 + \nu_p}} \quad (2.26)$$

Das volumetrisch verfestigende Modell beschreibt ideal kompressible Materialien ($\nu_p = 0$) mit einem unveränderlichen $\beta = \sqrt{4,5}$. Abb. 2.10 illustriert die inkrementelle Spannungsänderung $\partial\sigma$ der initialen Fließfläche F_0 (siehe Gl. (2.15)) am Beispiel des volumetrisch verfestigenden *Crushable Foam*-Modells unter Zuhilfenahme der geometrischen Darstellung G des plastischen Potentials g gemäß Gl. (2.25) mit $\beta = \sqrt{4,5}$. Der sich ergebende Spannungszustand σ^* liegt auf der verfestigten Fließfläche F^* .

2.5. Finite Elemente Methode

Die FEM stellt eine Technik zur approximativen Lösung beispielsweise struktureller Probleme dar. Für den Kontext mechanischer Problemstellungen besitzt die zu lösende Differenzialgleichung (DGL) die Form

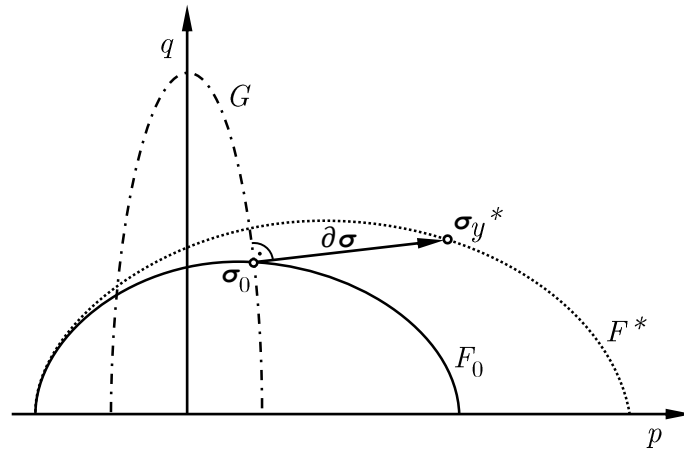


Abb. 2.10.: Visualisierung der Ermittlung des Spannungsinkrements unter Darstellung von Fließregel nach Deshpande-Fleck gemäß Gl. (2.15) und plastischem Potenzial für $\nu_p = 0$ gemäß Gl. (2.26).

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{D} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{B}(t) \quad (2.27)$$

mit

- \mathbf{M} Massenmatrix
- \mathbf{D} Dämpfungsmatrix
- \mathbf{C} Steifigkeitsmatrix
- \mathbf{B} Vektor extern wirkender Kräfte
- \mathbf{u} Verschiebungsvektor
- $\dot{\mathbf{u}}$ Geschwindigkeitsvektor
- $\ddot{\mathbf{u}}$ Beschleunigungsvektor

Zur Lösung wird das Problem durch Knoten und Elemente diskretisiert, die den Matrix- und Vektorkomponenten in Gl. (2.27) zugeordnet sind. Anschließend werden stetige Näherungsfunktionen für die exakte Lösung numerisch ermittelt [83–85]. Man unterscheidet zwei Lösungsverfahren transienter Probleme.

Das Verfahren impliziter Zeitintegration zeichnet sich dadurch aus, dass der *Solver* darauf abzielt anhand des energetischen Equilibriums zwischen zwei betrachteten Zuständen iterativ einen definierten Fehler zu unterschreiten, um eine akzeptable Lösung zu erhalten. Im Falle hoher Nicht-Linearität des Problems kann dies erhebliche Schwierigkeiten in der Konvergenz verursachen.

Für transiente, hochgradig nicht-lineare Probleme bietet sich das explizite Zeitintegrationsverfahren an. Hierbei wird ausgehend vom bekannten, aktuellen Zustand des Systems der Folgezustand extrapoliert. Entscheidend für die Qualität der Prognose ist ein kleiner Extrapolationsschritt, sodass die ermittelte Lösung dem transientem Verlauf der exak-

2. Grundlagen und Stand der Technik

ten Lösung möglichst präzise folgt. Dies ist von besonderer Bedeutung, da die ermittelte Lösung den Ausgangspunkt für die Folgeiteration darstellt und sich Fehler kumulieren.

Bezogen auf den Kontext der Arbeit, der Modellentwicklung für Crash-Anwendungen, sind das explizite Zeitintegrationsverfahren und damit verbundene Stabilitätskriterien relevant, auf die an entsprechender Stelle eingegangen wird.

Da es sich bei der FEM um eine etablierte Methode in modernen Auslegungsprozessen handelt, wird an dieser Stelle auf die umfassende Literatur zu Theorie und Anwendung verwiesen.

2.6. Ansätze zur mechanischen Modellierung von Lithium-Ionen-Zellen

Bei den in Abschnitt 2.3 dargestellten experimentellen Untersuchungen erfolgt in den Arbeiten in der Regel die Ableitung von mechanischen Modellierungsansätzen analytischer Natur und für die FEM. Tab. 2.3 gliedert die in der Literatur vorhandenen Modellierungsansätze anhand der in Abschnitt 2.4 erläuterten Bestandteile mechanischer Materialmodellierung. Allen Ansätzen ist eine Homogenisierung des mechanischen Verhaltens gemein, die entweder direkt makro-rheologisch oder über die Methode eines repräsentativen Volumenelements (RVE) durch einen Transfer von der mikro-rheologischen Ebene erfolgt [59, 60].

Nachdem in den Versuchen signifikante Deformationen untersucht werden, werden die elastischen Parameter meist geschätzt oder vernachlässigt und entsprechend nicht angegeben. Die häufig als sehr gering angenommenen initialen Fließbedingungen $\sigma_0 = \sigma_y(\varepsilon_p = 0)$ führen ohnehin zu einer sofortigen Plastifizierung.

Zur numerischen Modellierung bedienen sich alle Ansätze in kommerzieller Software vollständig implementierter Materialmodelle, die über verschiedene Kalibrierparameter für plastisches Verhalten verfügen.

Das am häufigsten eingesetzte Materialmodell **MAT63** (*Crushable Foam*) in dem Solver LS Dyna [52, 53, 58, 63, 64, 68] kombiniert eine rein auf Scherung sensitive Fließfläche nach von Mises mit einer Fließregel idealer Kompressibilität. Hierdurch wird die in Abschnitt 2.3 beschriebene ausbleibende transversale Ausdehnung bei quasistatischen, lateralen Deformationen nachgebildet [53, 64, 68]. Beim einzigen Ansatz mit einer von null verschiedenen plastischen Querkontraktionszahl wurde diese zur Sicherstellung numerischer Stabilität gewählt [54].

Die Implementierung des Modells *Crushable Foam* in der Software Abaqus unterscheidet sich in der zugrundeliegenden auf hydrostatische Randbedingungen sensitiven Fließfläche. Diese wird intern über die Parameter k und k_t gemäß Gl. (2.28) und Gl. (2.29) beschrieben. Beide verfügbare Optionen basieren auf dem Fließkriterium gemäß Gl. (2.15) [77].

Bei der isotropen Formulierung sind die Fließbedingungen auf der hydrostatischen Achse p_c und p_t identisch. Daher ergibt sich eine hinsichtlich einer deviatorischen Ebene mit $p = 0$ symmetrische elliptische Form. Der Formfaktor α ergibt sich in diesem Fall zu

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{9 - k^2}} \quad \text{mit} \quad k = \frac{\sigma_{y0}}{p_{c0}}. \quad (2.28)$$

Die volumetrische Option erzeugt eine entlang der hydrostatischen Achse verschobene Ellipse. Der Formfaktor ermittelt sich zu

2.6. Ansätze zur mechanischen Modellierung von Lithium-Ionen-Zellen

Tab. 2.3.: Publiizierte Ansätze zur Modellierung des mechanischen Materialverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen.

Elastizität		Plastizität		Verfestigung	Versagen
E	ν	F	G	$\sigma_y(\varepsilon_p)$ /MPa	
-	-	\perp	Δ : $\nu_p = 0$	$\approx 575\varepsilon_p^{1,85}$	$\sigma_{tc} = 10$ [52]
4200	-	\perp	Δ : $\nu_p = 0$	$\approx 500\varepsilon_p^{1,5}$	$\sigma_{tc} = 21$ [58]
-	-	\perp	Δ : $\nu_p = 0$	$426\varepsilon_p^{2,78}$	$\sigma_{tc} = 25$ [63]
-	-	\perp	Δ : $\nu_p = 0$	$276\varepsilon_p^{1,8}$	$\sigma_{tc} = 30$ [63]
-	-	\perp	Δ : $\nu_p = 0$	$1997\varepsilon_p^{2,78}$	$\sigma_{tc} = 13$ [63]
-	-	\perp	Δ : $\nu_p = 0$	$498\varepsilon_p^2$	$\sigma_{tc} = 10$ [68]
500	0,01	\perp	Δ : $\nu_p = 0$	$\approx 566\varepsilon_p^2$	$\sigma_{tc} = 56$ [64]
500	-	\perp	Δ : $\nu_p = 0$	$550\varepsilon_p^2$	$\sigma_{tc} = 10$ [53]
500	0,15	\perp	Δ : $\nu_p = 0$	$930\varepsilon_p^{3,4}$	$\sigma_{tc} = 10$ [56]
1500	-	\perp	Δ : $\nu_p = 0,15$	$\approx 848\varepsilon_p^{2,7} + 0,84$	- [54]
305,5	0,2	Δ : $k = 1,1$	Δ : $\nu_p = 0$	$\approx 450\varepsilon_p^{3,2} + 3$	- [60]
-	-	Δ : $k = 1,1$ $k_t = 0,1$	Δ : $\nu_p = 0$	$\approx 566\varepsilon_p^2$	- [11]

\perp von-Mises Δ Deshpande-Fleck isotrop
 Δ Deshpande-Fleck volumetrisch
 ∇ assoziative Fließregel: $G = F$
 Δ nicht-assoziative Fließregel nach Gl. (2.25) und Gl. (2.26)
 - nicht angegeben
 \approx approximiertes Verfestigungsgesetz

$$\alpha = \frac{3k}{\sqrt{(3k_t + k)(3 - k)}} \quad \text{mit} \quad k = \frac{\sigma_{y0}}{p_{c0}} \quad \text{und} \quad k_t = \frac{p_t}{p_{c0}}. \quad (2.29)$$

Beide Studien, in denen dieses Modell Verwendung findet, schätzen k und k_t . So imitiert $k_t = 0,1$ eine signifikant geringere Fließbedingung hinsichtlich Zug- gegenüber Druckbelastungen. Hierbei werden bei negativem hydrostatischem Druck eine Delamination und Versagen nachgebildet [11]. Im Falle des MAT63 wird zur Modellierung des gleichen Phänomens eine Spannung σ_{tc} definiert, ab der das Modell unter Zugbelastung ideal plastisch reagiert. Abb. 2.11 illustriert dieses Verhalten, das daneben zur Identifikation eines Materialversagens benutzt wird [53, 60, 63, 64, 68].

Die abgeleiteten Verfestigungskurven $\sigma_y(\varepsilon_p)$ aller Studien sind oder können mit Exponentialfunktionen $\sigma_y = A + B \cdot \varepsilon_p^n$ approximiert werden. Die initialen Fließspannungen $\sigma_0 = A$ werden in der Regel vernachlässigt, wie in Tab. 2.3 dargestellt. Der vorangestellte

2. Grundlagen und Stand der Technik

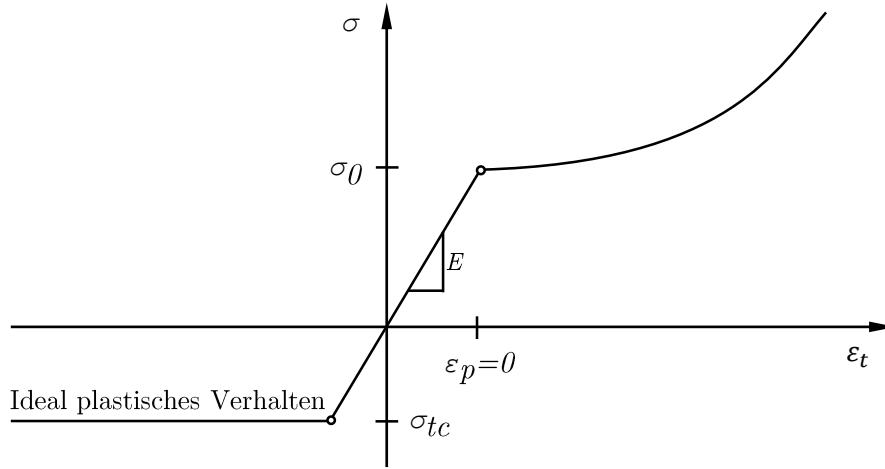


Abb. 2.11.: Darstellung der Verfestigungskurve des *Crushable Foam* Modells in der Software LS Dyna.

Faktor B zeigt eine deutliche Varianz zwischen den Studien und der Exponent $n > 1$ beschreibt stets progressive Verfestigungskurven.

Für geschwindigkeitsabhängige Modellierungsansätze existieren zwei Formulierungen. Auf Basis quasistatischer Messungen und hochdynamischer Fallturmtests mit 2 bis 3.5 m s^{-1} wurde eine exponentielle Dehnratenabhängigkeit gemäß Gl. (2.30) ermittelt [56].

$$\sigma_y(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p) = \sigma_y(\varepsilon_p) \cdot e^{0,02085 \frac{\dot{\varepsilon}_p}{1 \text{ s}^{-1}}} \quad (2.30)$$

Die zweite Arbeit basiert auf Deformationsversuchen mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit und stellt basierend auf dem Verfestigungsgesetz nach Johnson-Cook (Gl. (2.20)) einen logarithmischen Zusammenhang mit den Dehnratensensitivitäten $C = 0,0732$ für Pouchzellen und $C = 0,0971$ für elliptische Zellen auf [86].

2.7. Kernbotschaften zum Stand der Technik

- I. Mit Auftreten eines Kurzschlusses der Zelle besteht die Gefahr, dass diese in einen irreversiblen kritischen Zustand versetzt wird und eine stark exotherme Reaktion des energetischen Materials folgt.
- II. Experimentelle Untersuchungen von Lithium-Ionen-Zellen wurden bislang nicht am prismatischen Zellformat durchgeführt.
- III. Der Zustand der Prüflinge ist aus Sicherheitsgründen meist auf inaktive Zellen ohne Elektrolytzugabe oder einen sehr geringen Ladegrad beschränkt. Ein eindeutiger Einfluss des Zustands und Ladegrads lässt sich folglich nicht quantifizieren.
- IV. Die Eigenschaften werden in den Analysen meist lateral zum laminaren Aufbau ermittelt. Lediglich drei Studien befassen sich mit einer schichtparallelen Belastung der Zellen.
- V. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen basieren auf relativ kleinen Stichprobenzahlen.
- VI. Den Studien liegen meist quasistatische Deformationsgeschwindigkeiten zugrunde.
- VII. Eine ideale Kompressibilität der Materialien im Zellinneren wurde aus der visuellen Beobachtung quasistatischer Versuche abgeleitet.
- VIII. Alle Modellierungsansätze nutzen Homogenisierungsmethoden und vernachlässigen die laminare Struktur des Zellinneren.
- IX. Aufgrund der stets unwesentlichen initialen Fließspannungen σ_0 wird der linear elastische Bereich in der Regel vernachlässigt.
- X. Das *Crushable Foam* Modell mit idealer plastischer Querkontraktion $\nu_p = 0$ in Verbindung mit einem isotropen, exponentiellen Verfestigungsgesetz stellt die etablierte Modellierungsmethode dar.
- XI. Die virtuelle Beurteilung kritischer Beschädigungen erfolgt auf Basis des lokalen mechanischen Spannungszustands.

3. Forschungsfragen

Mit quasistatischen Szenarien wurde im Stand der Technik hinreichend nachgewiesen, dass Lithium-Ionen-Zellen mechanisch belastet und deformiert werden können, bevor diese in einen kritischen Zustand mit einem möglichen thermischen Durchgehen übergehen. Für die automobilen Anwendung stellt sich die weiterführende Frage, ob eine Lithium-Ionen-Zelle im Crash-Fall auch mit dynamischen Geschwindigkeiten signifikant belastbar ist und wie eine prognosefähige, virtuelle Auslegungsmethode zu gestalten ist.

Hierzu sind folgende Fragestellungen zu beantworten:

- I. Lässt sich das bereits identifizierte Verhalten von Li-Ionen-Zellen anderer Formfaktoren auf prismatische Zellen transferieren?
- II. Unter welchen Voraussetzungen lassen sich die etablierten Ansätze zur Modellierung anwenden?
- III. Besteht eine Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Belastungsgeschwindigkeit und -richtung bezogen auf den laminaren Aufbau?
- IV. Beeinflusst der Betriebszustand der Lithium-Ionen-Zellen das mechanische Verhalten?
- V. Hat die Reife der Entwicklung und der Fertigung einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften oder deren Varianz bzw. welches ist die notwendige Reife zur belastbaren, mechanischen Charakterisierung?
- VI. Wie können die identifizierten Phänomene in ein prognosefähiges Modell zur FE-Simulation überführt werden?
- VII. Unterliegt die zu entwickelnde Simulationmethode Grenzen der Validität und wie können diese beschrieben werden?

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

Das nachfolgende Kapitel befasst sich mit der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Versuchsreihe zur Schließung der in Kapitel 2 identifizierten Lücken hinsichtlich prismatischer Zellen.

Hierzu wird zunächst neben den Prüflingen der experimentelle Aufbau, der Versuchsplan, die Versuchsdurchführung und die Auswertungsmethodik erläutert. Anschließend werden die Ergebnisse hinsichtlich des Verfestigungsverhalten und der Versagenskonditionen präsentiert. Die Einflüsse verschiedener Randbedingungen wie Ladegrad, Produktreife und Dehnratenabhängigkeiten werden dabei im Detail analysiert. Die visuelle Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen komplementiert die Ergebnisse um makrorheologische Beobachtungen bezüglich des Deformationsverhaltens und im speziellen der Kompressibilität.

Eine abschließende Interpretation der Ergebnisse bildet die Grundlage für das anschließende Kapitel 5 zur adäquaten Modellierung der Phänomene.

4.1. Erläuterung des experimentellen Aufbaus

4.1.1. Beschreibung der Prüflinge

Alle untersuchten Prüflinge entsprechen dem identischen Industrieformat *PHEV2* gemäß dem Verband der Automobilindustrie (VDA) und besitzen den in Abschnitt 2.1 erläuterten und in Abb. 4.1 skizzierten Aufbau. Die Elektroden sind in vertikaler x_3 -Richtung in Form von zwei Wickeln integriert. Die metallischen Trägerfolien ragen an bestimmten abwechselnden Positionen in x_3 -Richtung aus den Wickeln hervor, um die Kontaktierung von Kathode und Anode an die Batteriepole zu ermöglichen. Eine Schweißnaht verschließt das Zellgehäuse mit der Deckplatte, in die die elektrisch isolierten Batteriepole eingebettet sind. Anschließend tränkt ein Flüssigelektrolyt alle inneren Komponenten, um das elektrochemische Element zu bilden. Eine in der Deckplatte befindliche Membran fungiert als Sicherheitsvorrichtung, die im Falle eines thermischen Ereignisses vor dem Gehäuse birst.

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführte Versuchsreihe untersucht fünf grundlegende Zelltypen, die dem Stand der Technik in der Automobilindustrie über fünf konsekutive Jahre entsprechen. Tab. 4.1 fasst die zentralen Eigenschaften zusammen. Die erste Spalte weist den Basistypen fortan verwendete Identifikatoren zu, die den spezifischen Energieinhalt (Spalte 2) und die Komponentenreife (Spalte 3) codieren. Der spezifische Energieinhalt beziehungsweise Zustand der Zellen teilt sich in niedrig (L), hoch (H), ohne Elektrolytbefüllung (T) und leere Zellgehäuse ohne Wickel (L ohne Index).

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

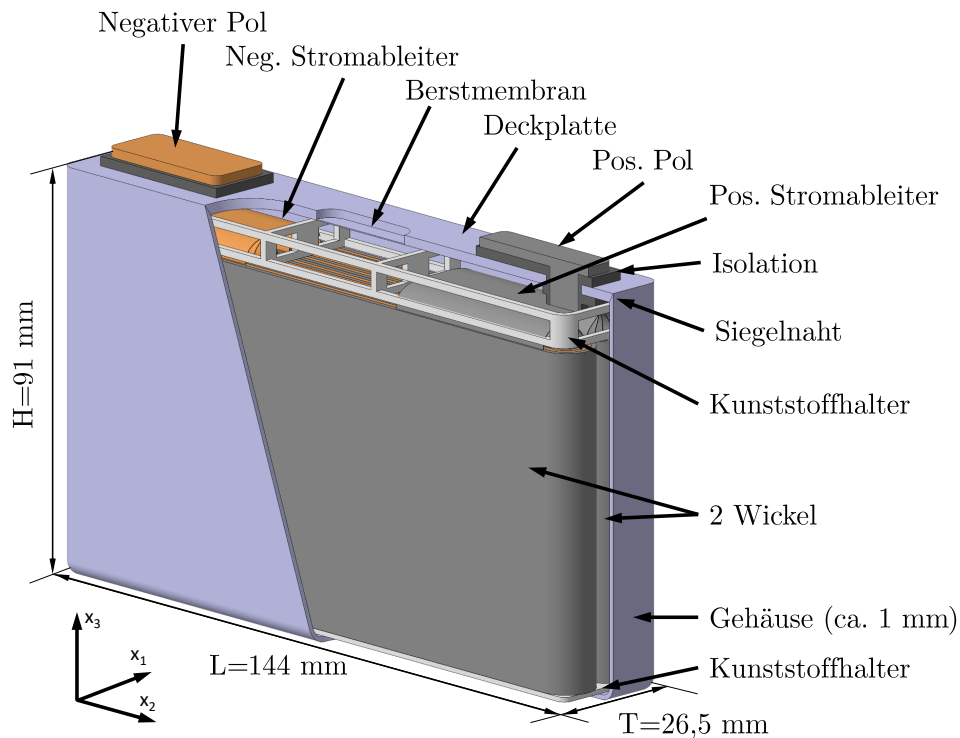


Abb. 4.1.: Schematische Abbildung einer typischen prismatischen Zellen im Automobilsektor mit zwei Jellyrolls.

Die Komponentenreife untergliedert sich entsprechend der Musterphasen nach dem VDA folgendermaßen [87]:

Prototyp

Aufbauten die mit hohem Anteil an Tätigkeiten in Manufaktur mit nur teilweise Erfüllung qualitativer und funktionaler Anforderungen.

Teilindustrialisiert

Komponenten deren Industrialisierungsstand fortgeschritten ist, bei denen Manufaktur jedoch noch zulässig ist. Alle Funktionen der späteren Komponente sind bereits vollumfänglich erfüllt.

Kleinserie

Bei der Herstellung kommen bereits seriennahe Werkzeuge und seriennahe Prozesse zum Einsatz. Der Funktionsumfang ist vollständig gegeben.

Großserie

Komponenten aus vollindustrialisierter Fertigung, die dem Verbauzustand in Serienfahrzeugen entsprechen.

Tab. 4.1.: Identifikatoren der Prüflingstypen.

ID	Spezifische Energie / Zustand	Komponentenreife
L _m	Niedrig	Teilindustrialisiert
L _s	Niedrig	Kleinserie / Vorserienstand
L _S	Niedrig	Serienstand
H _p	Hoch	Prototyp
H _m	Hoch	Teilindustrialisiert
T _m	Ohne Elektrolyt	Teilindustrialisiert
L	Zellgehäuse	

4.1.2. Aufbau der Versuchsanlage und -szenarien

Die Messungen erfolgten auf einem hydraulischen Prüfstand, der dediziert für dehnratenabhängige Deformationsuntersuchungen energetischen Materials mit quasi-konstanten, hohen Geschwindigkeiten konzipiert ist. Die Anlage ist mit Geschwindigkeiten \dot{d} zwischen 0.01 mm s^{-1} bis 5 m s^{-1} betreibbar und ermöglicht (quasistatische) Maximalkräfte bis 500 kN.

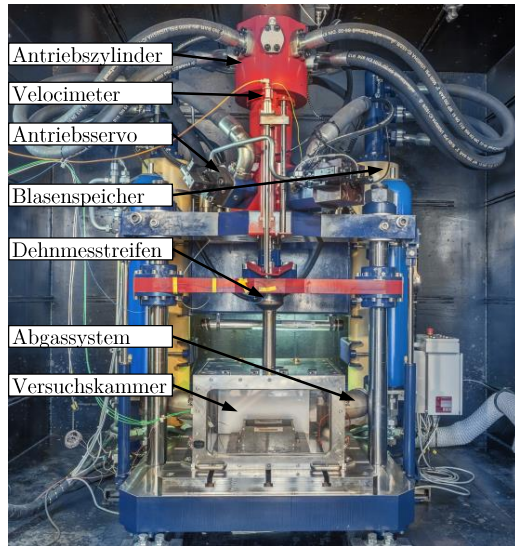
In Abb. 4.2 (a) ist die Frontalansicht dargestellt. Der Prüfstand verfügt über eine geschlossene Versuchskammer mit einem Abgassystem zur Minimierung der Verschmutzung durch Splitter, Partikel und gasförmige Reaktionsprodukte. Über der Kammer befindet sich der vertikal angeordnete, zentrale Antriebszylinder der Anlage, dessen Betrieb bis 1 m s^{-1} durch einen geschlossenen hydraulischen Servokreis erfolgt. Höhere Geschwindigkeiten werden mittels vorgespannter Blasenspeicher und variablen Ventilen realisiert, die den Fluidstrom entsprechend der zu erzielenden Geschwindigkeit regulieren. Der Antriebszylinder ist in einem massiven Prüfgestell arretiert, an dessen Bodenplatte die Prüfkammer ebenfalls fest verbunden ist. Im Wesentlichen beschränkt sich der bewegliche Teil der Apparatur auf den Kolben, der durch eine Traverse mit Linearführungen gelagert ist und an dessen unterem Ende die Möglichkeit der Befestigung verschiedenartiger Intrusionskörper besteht. Abb. 4.2 (b) zeigt eine vergrößerte Aufnahme innerhalb der Prüfkammer mit einer montierten, halbkugelförmigen Intrusionsgeometrie, wie sie in Szenario S zum Einsatz kam.

Die drei in den Abbildungen Abb. 4.2 (c)-(e) schematisch dargestellten, untersuchten Versuchsszenarien orientieren sich grundlegend sowohl an den bereits in Tab. 2.2 dargelegten experimentellen Studien sowie den prinzipiellen Belastungsszenarien gemäß Abb. 2.8:

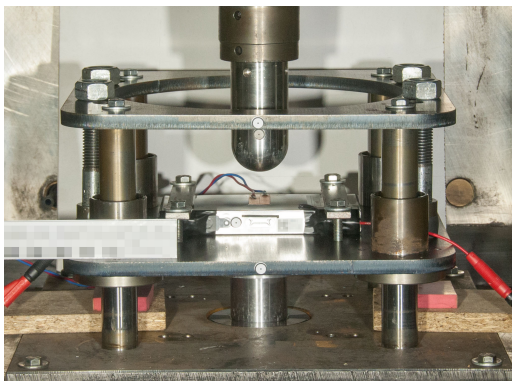
- Eine achsensymmetrische Konfiguration normal zum laminaren Aufbau des Zellinneren mit einem sphärischen Impaktor (S),
- ein Deformationsszenario, das in einem quasi-ebenem Spannungszustand aufgrund der zylindrischen Geometrie resultiert (Z) sowie
- eine Anordnung in der die Belastung mit einem schmalen Zylinder parallel zur laminaren Struktur von der Unterseite der Zelle her erfolgt (U).

Der Auftreffpunkt der verschiedenen Geometrien liegt jeweils möglichst mittig bezogen auf die Zellabmessungen. Um sicher zu stellen, dass der Prüfling während des Beschleu-

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

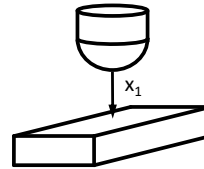


(a)



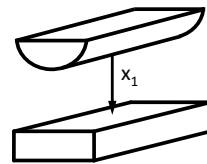
(b)

Szenario S



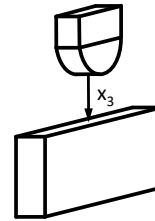
(c)

Szenario Z

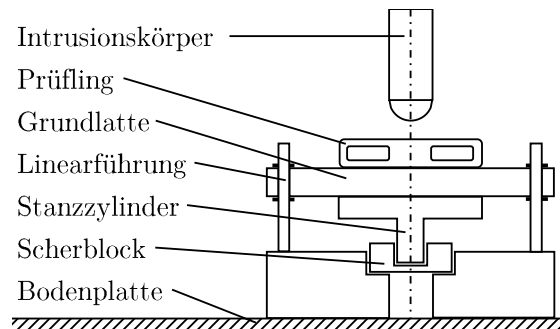


(d)

Szenario U



(e)



(f)

Abb. 4.2.: Experimentaler Aufbau: (a): Frontalansicht des Prüfstands. (b): Photographie eines Versuchsaufbaus Szenario S innerhalb der Prüfkammer. (c)-(e): Schematische Darstellung der drei Belastungsszenarien S, Z und U. (f): Schnittbild des kraftlimitierenden Vorrichtung bei Prüfkonfiguration S und Z.

4.1. Erläuterung des experimentellen Aufbaus

nigungsvorgangs in Position verweilt, dienen, wie in Abb. 4.2 (b) ersichtlich, zwei Metallstreifen der Fixierung in Szenario S. Diese überspannen die Zelle weitest vom Deformationsort entfernt zur Minimierung möglicher Einflüsse. Im Falle des zylindrischen Impaktors manipuliert eine solche Fixierung die Ergebnisse signifikant, da sie im relevanten Deformationsbereich liegt. Die Zelle wird deshalb in Szenario Z auf der Unterseite vollflächig mit doppelseitigem Klebeband mit dem Gegenlager des Prüfstands verbunden. In Szenario U wird eine Zelle vertikal mit nach unten gerichteten Terminals positioniert, wobei zwei Metallplatten an den großen Zellseiten anliegen und die Zelle mit einer definierten Vorspannkraft von 2 kN zusammendrücken. Die Konfiguration simuliert die Integration in einen Stapel aus mehreren gleichartigen Zellen, die von einem vorgespannten Rahmen umschlossen werden. Dies stellt eine verbreitete Assemblierung zur Schaffung sogenannter Zellmodule dar [1, 15]. Bevor der entstehende Reibschluss gegenüber den Platten erzeugt wird, entsteht durch einen schmalen, unter die Zelle greifenden Absatz von etwa 2 mm ein formschlüssiges Lager, sodass die Zelle bei der von oben wirkenden Kraft in definierter Position gelagert wird. Beim beschriebenen Zusammenbau stellen entsprechende Aussparungen im Umgriff sicher, dass die beiden Batteriepole weder bei der Montage noch im Versuch direkt belastet oder kontaktiert werden.

Die Wahl der Radien der drei Impaktgeometrien beruht auf der Zielsetzung, möglichst realitätsnahe, crashrelevante Szenarien nachzubilden. Anhand EuroNCAP Car-to-Pole-Crash-Simulation mit einem Norm-Pfahldurchmesser von 254 mm werden die resultierenden, deformierten Strukturen von EV-Fahrzeugen in Richtung der Zellmodule bei maximaler Intrusion analysiert. Die deformierende Crashstruktur des Fahrzeugs, im speziellen der Längsträger, kumuliert sich im Kollisionsbereich auf eine Dicke von etwa 25 mm um den Pfahl. Somit ergibt sich ein lokaler Lastfall, der in einer großflächigen Deformation des betroffenen Zellmoduls resultiert und durch den Modulrahmen eine hinzukommende Lastverteilung gegenüber der Zelle aufweist.

Konträr zu dieser Veranschlagung kann angenommen werden, dass das Eindringen möglichst kleiner Geometrien das Versagen der isolierenden Separatoren begünstigt. Dieser Modus wird beim Nagelpenetrationstest benutzt, um bei kontrollierter Perforationsposition ein thermisches Ereignis zu provozieren [1].

Unter Berücksichtigung beider Ansätze wird als Kompromiss die Pfahlgeometrie durch eine infinitesimal kleine Linien- oder Punkt-Geometrie substituiert und mit der kumulierten Materialstärke der Fahrzeugstruktur umgeben. Folglich wird ein Radius von 25 mm für die zylindrischen und sphärischen Impaktgeometrien gewählt. Somit entsteht ein Ersatzlastfall, der sowohl den Vorteil einer guten Lokalisierung als einer realitätsnahen Deformationsgeometrie aufweist, zumal der EuroNCAP-Pfahlcash selbst einen synthetischen Lastfall darstellt.

Für die Szenarien S und Z entsteht bei hohen Impaktgeschwindigkeiten durch die relativ kleinen Abmessungen T der Zellen und der entsprechend geringen Energieabsorptionsfähigkeiten ein Beschädigungsrisiko für den Prüfstand. Nachdem der Zelle die gewünschte Intrusion widerfahren ist, benötigt die Anlage bei den höchsten Geschwindigkeiten etwa 50 mm für die Verzögerung bis zum Stillstand. Es ist davon auszugehen, dass der Stempel mit beträchtlicher Restgeschwindigkeit auf das Gegenlager unter der Zelle trifft.

Daher wird die in Abb. 4.2 (f) abgebildete Entkopplungsvorrichtung in den Aufbau integriert, die zur Begrenzung der auftretenden Maximalkraft unterhalb der Belastungsgrenze des Prüfstandrahmens konzipiert ist. Die Vorrichtung besteht aus einem kreisförmigen

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

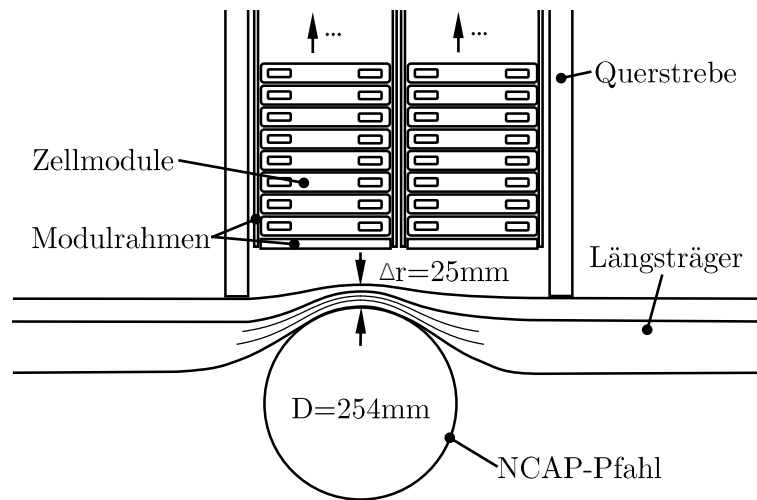


Abb. 4.3.: Schematisches, maßstabsgetreues Deformationsbild eines strukturintegrierten Hochvoltspeichers bei einer EuroNCAP-Pfahlsimulation mit seitlicher Intrusion ins Fahrzeug.

Scherblock, der einen Stanzzylinder in einer zentralen Tasche stützt und sich bei der Prüfzylinderdeformation im Kraftpfad befindet. Auf dem Zylinder ruht eine flache Metallplatte, die als Grundplatte für die Prüflinge dient. Die zur Abscherung notwendige Kraft wird durch Material und Dicke des Blocks bestimmt und so gewählt, dass sie signifikant über der zu messenden, jedoch unterhalb einer riskanten Belastung liegen. Nachfolgend wird das Gegenlager freigegeben und der Stempel kann frei abbremsen, bis er zum Stillstand kommt.

Basierend auf zunächst quasistatisch durchgeführten Messungen wird die notwendige Kraft zur Zelldeformation auf etwa 80 kN für Szenario S und 300 kN Szenario Z ermittelt. Die daran angelehnte Dimensionierung der Scherzylinder ergibt mit 200 kN respektive 400 kN Versagenskräfte unterhalb der dargelegten Auslegung des Prüfstands auf einen sicheren und verlässlichen Betrieb mit bis zu 500 kN.

4.1.3. Sensorik und Ablauf der Messungen

Während eines Experiments werden der vom Impaktor zurückgelegte Weg, die Zellspannung und die aufgewendete Deformationskraft gemessen. Die Zellspannung wird direkt gemessen, indem die Zellpole, wie in Abb. 4.2 (b) ersichtlich, an den Eingang des Transientenrekorders angeschlossen werden. Geschwindigkeit und Weg werden mit einem laserbasierten Velocimeter erfasst, das die Bewegung der Traverse erfasst. Dieses Signal wird durch ein optisches Tracking-System verifiziert, das mit den Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen arbeitet. Hierzu werden, wie in Abb. 4.2 (b) ersichtlich, an relevanten Stellen Markierung an Prüfanlage, -vorrichtung und Prüfling angebracht, die eine quantifizierbare Verfolgung von Bewegungen über die Einzelbilder hinweg ermöglichen. Zwischen den Ergebnissen beider Messverfahren wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Zur Bestimmung der wirkenden Deformationskraft sind drei Dehnmessstreifen radial gleichver-

Tab. 4.2.: Definition der geschwindigkeitsabhängigen Datenaufzeichnungsraten.

\dot{I} / s^{-1}	Datenaufzeichnungsrate /Hz	Bildaufzeichnungsrate /Hz
$10^{-2} - 10^{-1}$	10^3	10^2
$10^{-1} - 10^0$	10^4	10^3
$10^0 - 10^1$	10^5	$5 \cdot 10^3$
$10^1 - 10^2$	10^6	10^4
$10^2 - 10^3$	10^6	10^4

teilt am demontierbaren Zentralkolben angebracht. Diese werden vor jeder Versuchsreihe kalibriert und anschließend der Prüfstand wieder assembliert. Bei der Rekalibrierung des Kolbens nach erfolgter Testreihe waren keine Abweichung gegenüber der Kalibrierung festzustellen.

Die ermittelten Messwerte werden mit einem Transientenrekorder (MF-Instruments, TransCom) bei 12 Bit und einer maximalen Abtastrate von bis zu 10 MHz aufgezeichnet. Tab. 4.2 stellt die im Versuch verwendeten spezifischen Abtastraten zwischen 1 kHz und 1 MHz abhängig von der Intrusionsrate \dot{I} dar.

Wie bereits in Abschnitt 2.3 wird die Distanz zwischen dem vom Impaktor zurückgelegten Weg beim ersten Kontakt $d(t_0)$ bis zum aktuell zurückgelegten Weg $d(t)$ durch die relevante, vertikale Dimension D_v gemäß Gl. (4.1) normiert und ergibt die relative Intrusion I . Die Intrusionsrate \dot{I} stellt die Geschwindigkeit des Impaktors \dot{d} nach analoger Normierung dar.

$$I(t) = \frac{d(t) - d(t_0)}{D_v} \text{ mit } D_v = \begin{cases} T & \text{für die } x_1\text{-Richtung} \\ H & \text{für die } x_3\text{-Richtung} \end{cases} \quad (4.1)$$

Neben diesen Messdaten werden Hochgeschwindigkeitsvideos mit Bildraten bis zu 10^4 Bilder pro Sekunde aufgezeichnet. Tab. 4.2 zeigt die verwendeten Bildraten mit den zugehörigen Intrusionsraten \dot{I} . Die gewählten Aufzeichnungsraten entsprechen jeweils mindestens 10 Datenpunkten pro $I = 1\%$.

Jedes im Rahmen der Arbeit durchgeführte Experiment durchläuft die in Abb. 4.4 (a) bis (h) schematisch dargestellten Phasen:

Beschleunigung und Annäherung des Impaktors

Durch die Aktivierung der Servos oder Öffnen der variablen Ventile entsteht hydraulischer Druck im Antriebszylinder, sodass der Kolben inklusive der Impaktorgeometrie in Richtung Prüfling beschleunigt wird. In dieser Phase regelt die Anlage die Geschwindigkeit auf den gewünschten Wert und behält anschließend die Servodrehzahl und den Öffnungsgrad der Ventile bei, bis das Signal zur Abschaltung der Anlage erfolgt. Mit der Aktivierung der Anlage wird ebenfalls die Datenakquise initialisiert.

Moment des Aufpralls

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

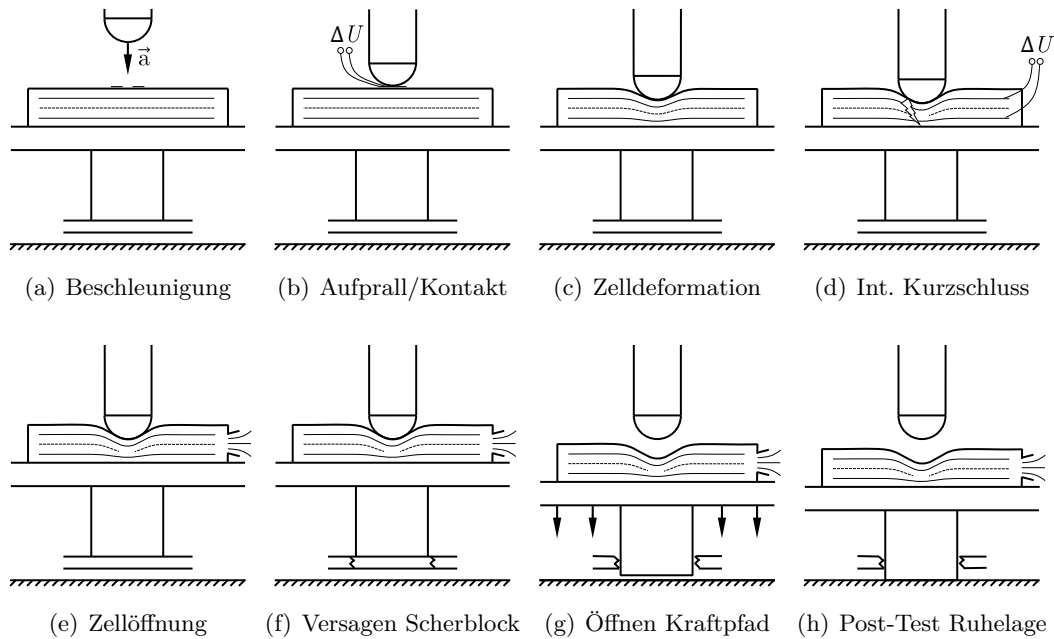


Abb. 4.4.: Phasen einer Messung.

Der Kontaktzeitpunkt der Impaktgeometrien mit den Proben t_0 wird durch die in Abb. 4.2 (b) dargestellten zwei Kupferfolien der Dicke von $50\text{ }\mu\text{m}$ bestimmt. Diese sind parallel zueinander mit geringem Abstand an der Oberseite der Zellen befestigt. Wenn der Stempel diese Folien kontaktiert, entsteht über den Kurzschluss eine Spannungsänderung (Kontaktspannung), die aufgezeichnet wird. Dieser Schritt zeigt den beginnenden Deformationsvorgang an und erleichtert die Bestimmung der Intrusionstiefe I erheblich.

Zelldeformation

In dieser Phase werden die wesentlichen Daten und Informationen für das makrorheologische Verhalten der Zellen ermittelt. Durch die zunehmende Intrusion wird der laminare innere Aufbau der Prüflinge zunehmend deformiert und die dazu notwendige Kraft gibt Aufschluss über den mechanischen Widerstand. Gleichzeitig erlauben die Hochgeschwindigkeitsvideoaufnahmen Rückschlüsse auf die Kompressibilität des Zellinneren.

Versagen der isolierenden Lagen

Der nach gewisser Intrusion auftretende interne Kurzschluss führt zu einem Abfall der Zellspannung. Die Maschine wird in diesem Moment abgeschaltet oder spätestens wenn eine bestimmte voreingestellte Intrusion durch einen zweiten Magnetschalter erkannt wird. Dieser dem Schutz der Anlage dienende Rückfallmechanismus wurde in keinem der Experimente aktiviert.

Öffnen der Berstmembran / Versagen des Zellgehäuses

Bei ausreichend geringer Versuchsgeschwindigkeit kann sich durch den zellinternen Kurzschluss ein thermisches Ereignis bilden. In diesem Fall ist in den Videoaufnahmen eine Öffnung der Berstmembran und ein Entgasen der Zelle erkennbar. In der Regel versagt jedoch bei signifikanter Deformation das Zellgehäuse, sodass der Druck durch die entstandenen Risse entweichen kann.

Versagen des Scherblocks und Öffnen des Kraftpfads

Nach dem Abschalten der Anlage besteht, wie bereits erläutert, eine erhebliche kinetische Energie in den beweglichen Teilen. In der Regel wird die Zelle hierdurch vollständig perforiert, bis die Intrusionsgeometrie auf das Gegenlager trifft und die Scherplatte auslöst. Der Prüfling und das Auflager befinden sich anschließend im quasifreien Fall, wodurch der Kraftpfad geöffnet wird.

Post-Test Ruhelage

Nachdem sämtliche kinetische Energie im Prüfaufbau abgebaut ist, liegt der Stanzzylinder auf dem Boden des Prüfstellrahmens auf. In dieser Phase finden eventuell ausgelöste thermische Ereignisse statt, wobei die dabei entstehenden Produkte durch die Lüftungs- und Filteranlage abtransportiert werden. Aus Sicherheitsgründen verbleibt die gesamte Anlage nach jedem durchgeführten Test eine Stunde lang verriegelt in dieser Phase.

4.2. Versuchsplanung

Abb. 4.5 stellt die zur Beantwortung der Forschungsfragen und für die in Kapitel 5 folgende Modellentwicklung relevanten Beobachtungsgrößen mit den interessierenden Einflussfaktoren gegenüber. Die vorgenommene Skalierung gibt Aufschluss über die Art der Bewertbarkeit der Ergebnisse. Gemäß der Definition in Abschnitt 2.2 erlaubt die quantitative Verhältnisskalierung von \dot{I} und SoC eine formelmäßige Beschreibung des Zusammenhangs, wohingegen für die weiteren Zusammenhänge nur relative Aussagen möglich sind.

Die Einflussfaktoren Komponentenreife und Zustand der Zelle (mit oder ohne Elektrolyten) geben eine fixe Faktorwahl mit diskreten Werten vor. \dot{I} und SoC besitzen quantifizierbare, stetige Ausprägungen. Dies gilt prinzipiell ebenso für die Belastungsrichtung winkelmäßig bezogen auf den laminaren Aufbau des Zellinneren. Aufgrund der üblichen Verbausituation innerhalb von EVs ergeben sich die laterale und parallele Belastungsrichtungen als besonders relevant, weshalb diese bereits in der Konzeption der Versuchsszenarien berücksichtigt sind und Extrema im Sinne einer Primärvariation darstellen.

Die Wahl fixer Faktorstufen für alle interessierenden Einflussgrößen ermöglicht die Minimierung von Störfaktoren durch reproduzierbare Wiederholungsmessungen. Störfaktoren, wie Vibrationen aufgrund des Beschleunigungsvorgangs, werden durch redundante Messsysteme für jeweils Weg und Kraft minimiert.

Einen schwer kontrollierbaren Störfaktor stellt die inhärente Inhomogenität des Wickelmaterials dar. Einerseits variiert die Partikelgröße und andererseits deren Verteilung

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

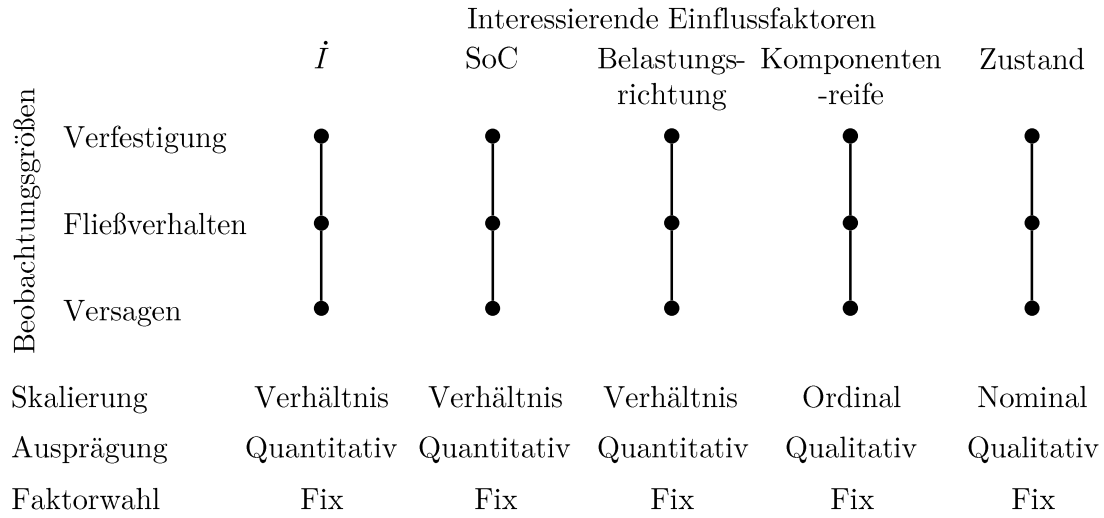


Abb. 4.5.: Schematischer Versuchsplan mit Gegenüberstellung interessierender Einflussfaktor und Beobachtungsgrößen.

Tab. 4.3.: Konkreter Versuchsplan für die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Testkampagne.

ID	SoC/Zustand	Szenario			\dot{I} /s ⁻¹
		Z	S	U	
L _m	0 %		✓	✓	10 ⁻² – 10 ²
L _s	0 % & 100 %	✓	✓	✓	10 ⁻³ – 10 ²
L _S	0 % & 100 %		✓	✓	10 ⁻² – 10 ²
H _p	0 % & 100 %		✓	✓	10 ⁻² – 10 ²
H _m	0 % & 100 %		✓	✓	10 ⁻² – 10 ²
T _m	ohne Elektrolyten		✓	✓	10 ⁻² – 10 ²

auf den Trägerfolien. Durch wiederholtes Messen identischer Versuchskonfigurationen und einer Einfaktorvariation wird diese Sekundärvariation minimiert.

Der konkrete Parameterbereich, der durch die Testreihe abgedeckt wird, ist in Tab. 4.3 dargestellt. In der ersten Spalte wird der Identifikator für die verschiedenen Prüflingstypen aufgelistet. Die Spalten zwei bis sechs enthalten die untersuchten Parameterbereiche von SoC, Szenarien und Intrusionsrate \dot{I} .

Mit Ausnahme der L_m-Prüflinge wurden alle Zellen mit 0 % und 100 % SoC die Extremwerte gemäß OCV-Kurve zur Maximierung der Primärvariation untersucht. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von L_m konnte nur ein SoC von 0 % getestet werden.

Der Typ H_m dient als Grundlage der Analyse des Einflusses der Abwesenheit des flüssigen Elektrolyts, indem die Prüflinge T_m ohne dessen Zugabe erzeugt wurden.

Die absoluten Geschwindigkeiten umfassen Größenordnungen von Bruchteilen von mm s⁻¹ bis hin zu 5 m s⁻¹. Die Werte sind anhand des zuvor herangezogenen EuroNCAP-Pfahlrash abgeleitet, der mit 32 km h⁻¹ \approx 9 m s⁻¹ durchgeführt wird. Eine weitere Absenkung der

Minimalgeschwindigkeit für den Kontext Fahrzeugcrash wurde als irrelevant eingestuft. Da die passiven Sicherheitskonzepte der Fahrzeugkarosserie die Relativgeschwindigkeit zwischen Hindernis und Hochvoltspeicher respektive enthaltener Zellen signifikant verringern, erscheint eine höchste getestete Geschwindigkeit, die etwa der halben Initialgeschwindigkeit entspricht, als ausreichend. Das große Intervall von \dot{I} in Kombination von Stufen in Form jeder darin liegenden Dekade erlaubt die Ermittlung einer detaillierten und ausgeprägten Primärvariation.

Alle Proben wurden in den Szenarien S und U getestet, Szenario Z wurde hingegen nur mit L_s angewendet.

Abgesehen von den erläuterten Einschränkungen, wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan aufgestellt und in Bezug auf alle angegebenen Parameter in Tab. 4.3 durchgeführt.

Zur Minimierung der Störgrößen und um zusätzliche statistische Merkmale zu erhalten, wurden für alle Faktorkombinationen drei Wiederholungsmessungen durchgeführt. Damit umfasst der experimentelle Umfang 312 Einzelversuche.

4.3. Auswertungsmethodik

Der Ablauf einer jeden Messung umfasst die in Abschnitt 4.1.3 erläuterten Phasen. Für die mechanische Charakterisierung der Lithium-Ionen-Zellen sind die Zelldeformation und der nach gewisser Intrusion auftretende interne Kurzschluss wesentlich. Da die Zelle nach Erreichen letzterer Phase in einen kritischen Zustand mit möglichem thermischen Durchgehen übergeht, werden zugehörige Parameter fortan mit dem Index c gekennzeichnet.

Die Messdaten der Deformationsphase zwischen dem Zeitpunkt des Kontakts t_0 und dem Zeitpunkt des internen Kurzschlusses t_c umfassen synchrone Verläufe der Deformationskraft F , der Zellspannung U und des zurückgelegten Wegs der Impaktorgeometrie d . Um eine reproduzierbare Extraktion der relevanten Daten zu ermöglichen, werden diese durch einen Algorithmus voranalysiert. Neben der Normierung auf die relative Intrusion I gemäß Gl. (4.1) ermittelt dieser vier Parameter, die die Verfestigung (Abschnitt 4.4.1) und das Versagen (Abschnitt 4.4.2) der Zellen charakterisieren. Zusätzliche Informationen über das Fließverhalten sind den Hochgeschwindigkeitsvideos entnehmbar (Abschnitt 4.4.3).

Eine exemplarische Messung der Deformationsphase ist in Abb. 4.6 dargestellt, wobei F und U über der relativen Intrusion I aufgetragen sind. Das Kontaktsignal des Stempels (siehe Abschnitt 4.1.3) ist nicht explizit dargestellt. Die vertikale schwarze Linie zeigt jedoch den gemessenen Spannungsabfall an, der die Kontaktzeit t_0 und den Beginn des Intrusionsvorgangs markiert.

Zur Identifikation des kritischen Deformationszustands der Zellen, ist die Beobachtung der Zellspannung und über deren signifikanten Abfall die Identifikation des zellinternen Strukturversagens üblich, ohne dass in der Literatur ein präzises Kriterium gegeben wird [4, 22, 27, 52–54, 56, 57, 60, 63–65, 68]. Zur wiederholgenauen Handhabung der Vielzahl an Messungen ist ein objektives Charakteristikum für diesen signifikanten Spannungsabfall vonnöten. Ein fester Wert für eine zu unterschreitende Zellspannung wurde verworfen, da die gemessene Spannung während der Verformung reversible, kleine Einbrüche aufweist. Daneben wurde ein kontinuierlicher Abfall der Zellspannung während der Deformation festgestellt, der ebenfalls einen fixen Grenzwert disqualifiziert. Beide Verfahren führen zu einer fehlerhaften Identifizierung von t_c . Ein Abfall von 2 % ($\hat{=}$ circa 60–80 mV, je nach

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

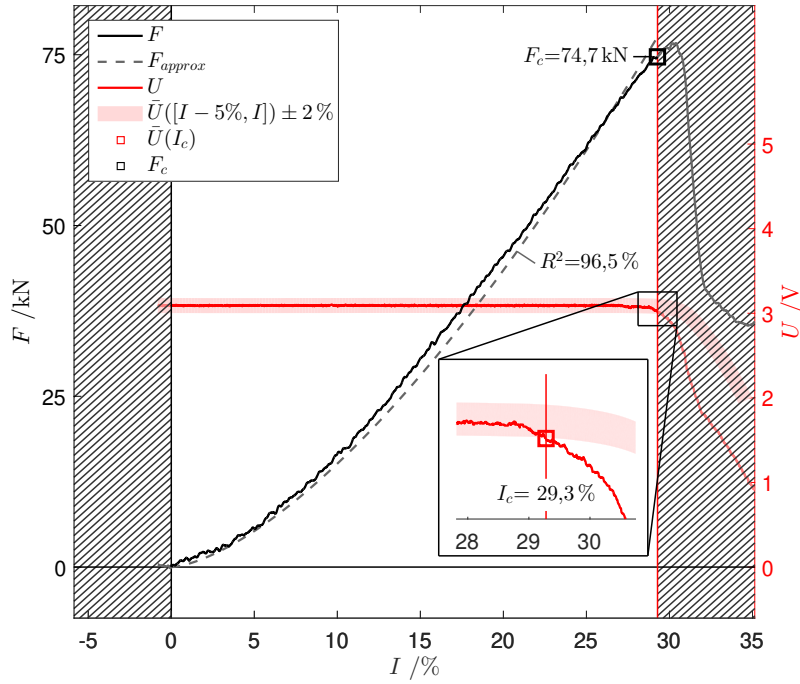


Abb. 4.6.: Exemplarische Messdaten der Kompressionsphase, die die gemessene Kompressionskraft F und die Zellspannung U als Funktion des relativen Intrusion I zeigen. Die charakteristischen kritischen Werte I_c und F_c werden durch einen signifikanten Abfall der Zellspannung bestimmt.

SoC) gegenüber dem gleitenden arithmetischen Mittel von U der vorherigen 5 % Intrusion stellt sich als stabil und zuverlässig heraus. Die vertikale rote Linie in Abb. 4.6 markiert den Zeitpunkt des entsprechend ermittelten Spannungsabfalls. I_c und F_c an dieser Stelle repräsentieren die zugehörige kritische relative Intrusion und die kritische Kompressionskraft, die die mechanischen Belastungsgrenzen der analysierten Zelle charakterisieren.

Zur Erleichterung der Identifikation der Einflüsse der in Abschnitt 4.2 erläuterten, interessierenden Faktoren in Bezug auf das Verfestigungsverhalten, werden die extrahierten Kraft-Intrusion-Kurven zwischen t_0 und t_c mit Gl. (4.2) approximiert, wodurch deren Beschreibung durch zwei Parametern B und n ermöglicht wird. Die Approximationsgenauigkeit wird durch das Bestimmtheitsmaß gemäß Gl. (2.4) beurteilt. Wie in Abb. 4.7 ersichtlich, ergeben sich für den Großteil der Kurven des Szenarios S Werte von $R^2 > 90\%$, während die Szenarien Z und U Werte bis oberhalb 80 % erreichen.

$$F_{approx}(I) = B \cdot I^n \quad (4.2)$$

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass als Ergebnis der Auswertung vier Parameter für die weitere Untersuchung der dynamischen Verfestigung und des Versagens zur Verfügung stehen: die beiden Verfestigungsparameter B und n und die beiden kritischen Versagensparameter I_c und F_c . Die Ergebnisse zu den Verfestigungsparametern werden

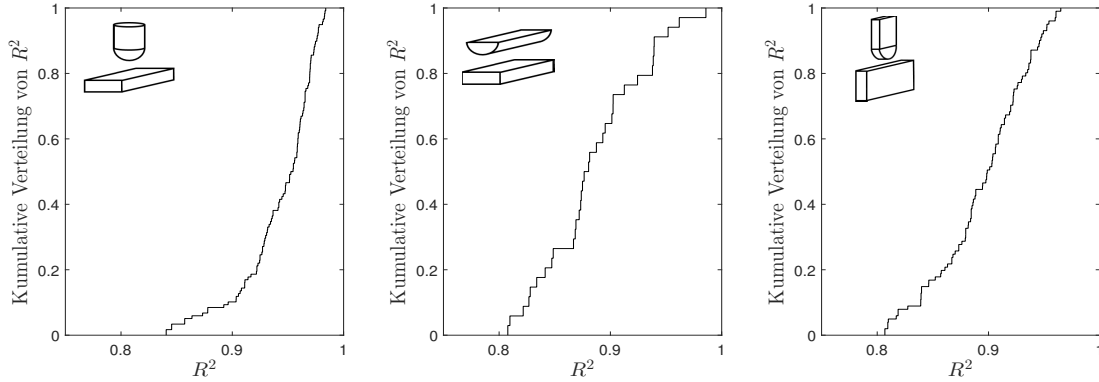


Abb. 4.7.: Kumulative Verteilungsfunktionen der Bestimmtheitsmaße für die Szenarien S, Z und U.

im nachfolgenden Abschnitt 4.4.1 und die ermittelten kritischen Parameter werden im anschließenden Abschnitt 4.4.2 analysiert.

4.4. Ergebnisse

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst eine reine Schilderung der Ergebnisse und deskriptiver Statistiken ohne deren Interpretation. Diese erfolgt anschließend, da für die Beurteilung einiger Wechselwirkungen das Vorliegen aller ermittelten Erkenntnisse hinsichtlich Verfestigung, Deformationsverhalten und Versagen vonnöten ist.

4.4.1. Verfestigung

Abb. 4.8 zeigt ausgewählte Verfestigungskurven für relative Intrusionsraten \dot{I} in allen Szenarien. Diese entstammen Experimenten mit den Prüflingen L_s als den einzigen in Szenario Z getesteten. Weiterhin sind die Zellen H_p für beide Szenarien S und U und T_m als Referenz für das mechanischen Verhalten der Zellen ohne Elektrolyten dargestellt. Die Rohdaten sind mit der im vorherigen Abschnitt 4.3 erläuterten Methode abgeleitet, d.h. die Kraft-Intrusions-Kurven der Deformationsphase zwischen t_0 und t_c wurden mittels Gl. (4.2) approximiert.

In allen Szenarien ist eine ausgeprägte Dehnratenabhängigkeit erkennbar. Quasistatische Deformationen führen bei funktionierenden Zellen zu einer progressiven Verfestigungskurve, während sich dynamische Intrusionen in einer linearen bis zu degressiven Kurve manifestieren. Dies ist am deutlichsten in Szenario Z ersichtlich, das mit den höchsten Geschwindigkeiten analysiert wurde. Wie in Abb. 4.8 (a) und (d) ersichtlich, ist den Verfestigungskurven der Szenarien S und Z ein etwaiger Schnittpunkt aller Kurven gemein.

Im Vergleich des Verfestigungsverhaltens der Prüflinge H_p (Abb. 4.8 (a)) mit T_m (Abb. 4.8 (b)) zeigen die trockenen Zellen für $I < 30\%$ einen geringeren Widerstand gegen mechanische Deformation.

Abb. 4.9 stellt die Abhängigkeit \dot{I} der Verfestigungsparameter B und n für alle in den Szenarien S und U analysierten Zellproben grafisch dar. Die oben beschriebene Krümmungsänderung der Verfestigung äußert sich in dieser Auswertung in einer logarithmischen

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

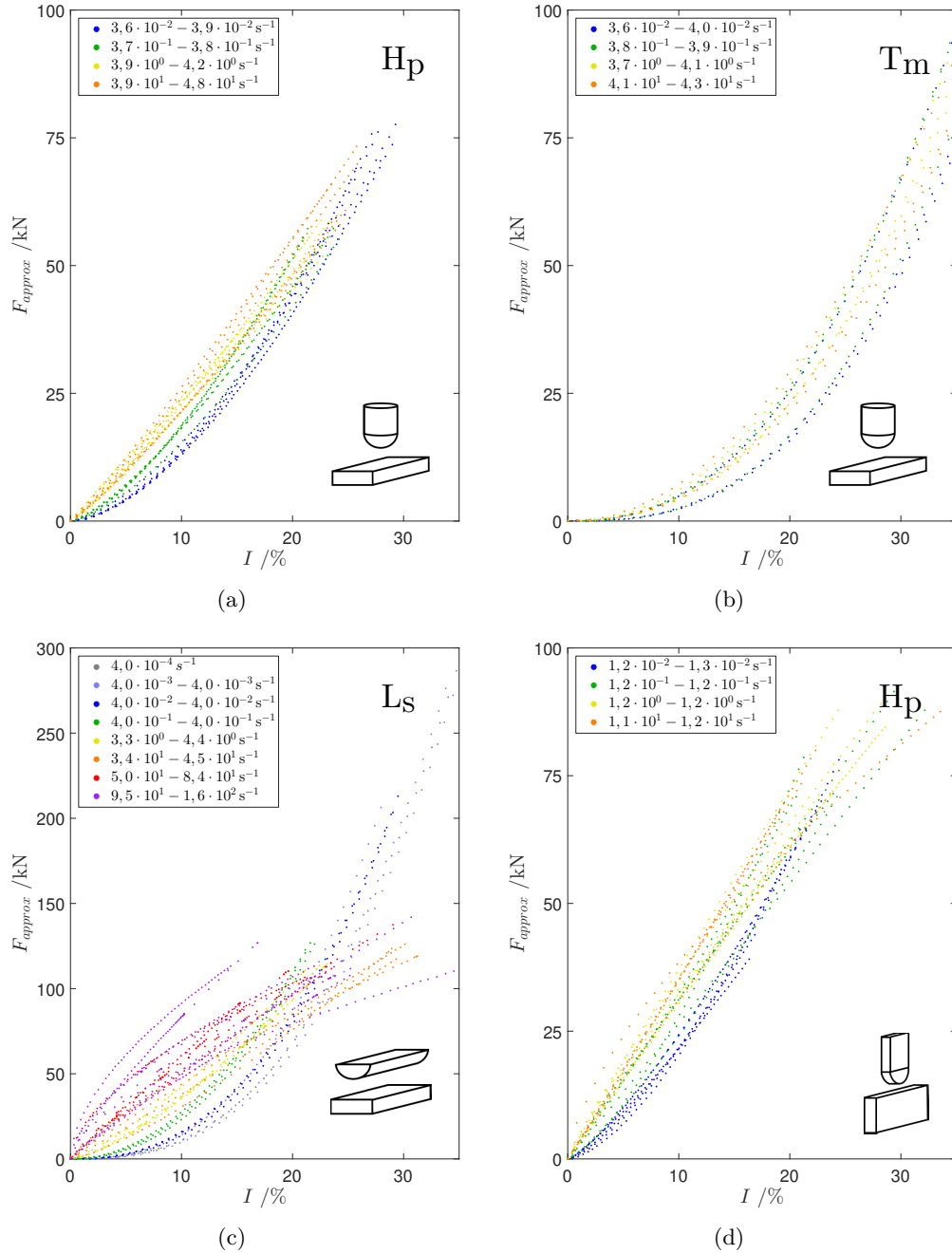
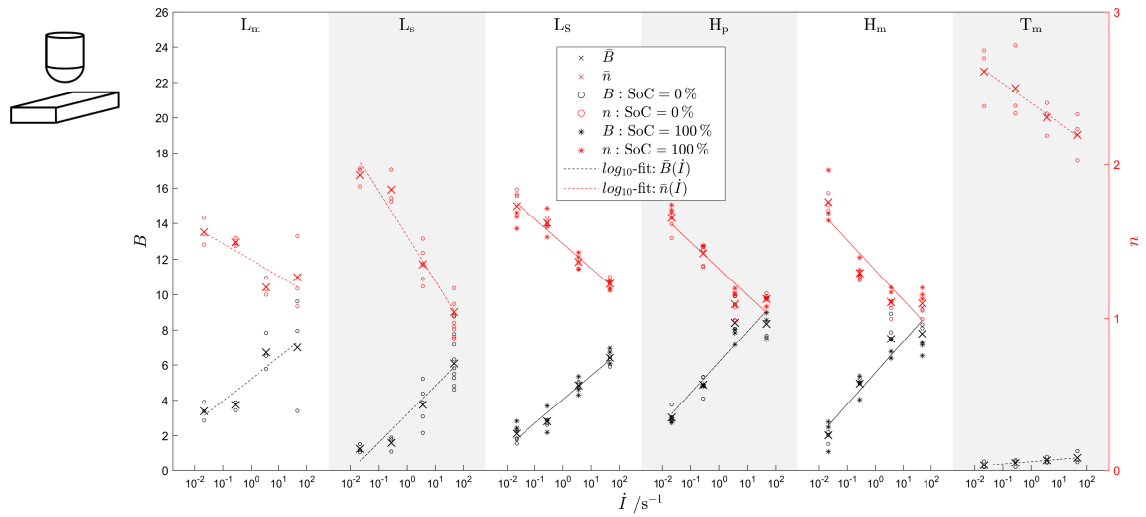
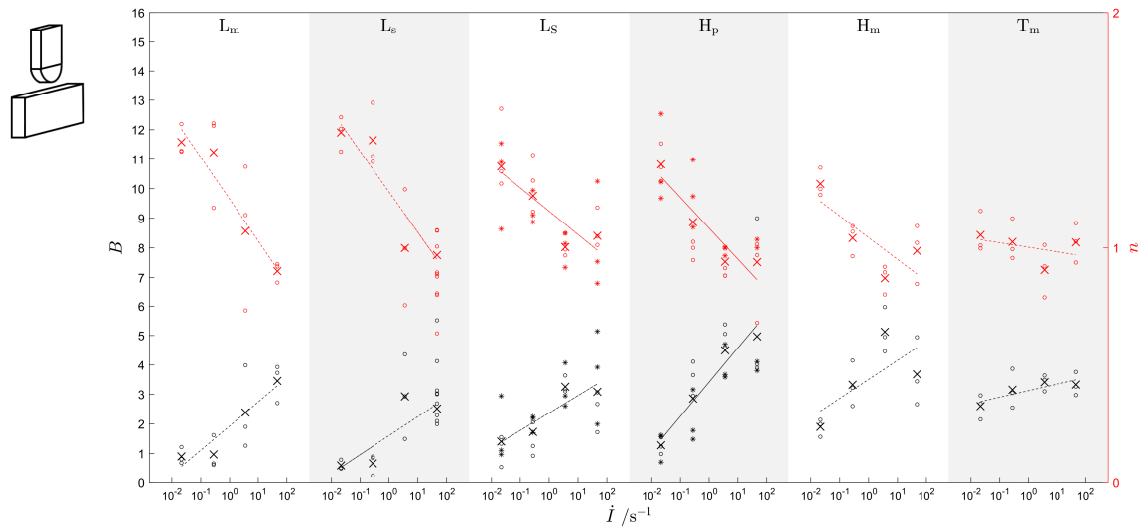


Abb. 4.8.: Verfestigungskurven gemäß Gl. (4.2) für unterschiedliche Faktorstufen der Intrusionsrate \dot{I} .



(a)



(b)

Abb. 4.9.: Abhängigkeit der Verfestigungsparameter B und n von der Intrusionsrate \dot{I} für alle Prüflinge.

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

Tab. 4.4.: Gegenüberstellung der Trendlinienparameter zur Approximation der Abhängigkeit der Mittelwerte der Verfestigungsparametern \bar{B} und \bar{n} von \dot{I} .

Szenario	$\bar{B}(\dot{I})$ bzw. $\bar{n}(\dot{I})$			L _m	L _s	L _S	H _p	H _m	T _m
S	$B_{0,S} + B_{1,S}log_{10}(\dot{I})$	mit	$B_{0,S}$	4,79	3,52	4,05	6,16	5,56	0,53
			$B_{1,S}$	1,47	1,71	1,55	1,95	1,99	0,15
	$n_{0,S} + n_{1,S}log_{10}(\dot{I})$	mit	$n_{0,S}$	1,41	1,51	1,48	1,32	1,31	2,40
			$n_{1,S}$	-0,12	-0,24	-0,18	-0,19	-0,21	-0,14
U	$B_{0,U} + B_{1,U}log_{10}(\dot{I})$	mit	$B_{0,S}$	1,87	1,68	2,21	3,41	3,51	3,12
			$B_{1,S}$	0,81	0,71	0,66	1,01	0,89	0,25
	$n_{0,U} + n_{1,U}log_{10}(\dot{I})$	mit	$n_{0,S}$	1,21	1,24	1,15	1,08	1,04	1,00
			$n_{1,S}$	-0,18	-0,17	-0,11	-0,14	-0,12	-0,02

Abnahme von n bzw. einer logarithmischen Zunahme von B über \dot{I} . Dieses Phänomen ist bei allen Versuchsreihen zu beobachten und erscheint grundsätzlich unabhängig von Komponentenreife, SoC und Energiegehalt.

Da sich keine signifikante und reproduzierbare Segregation der Parameter B und n bei unterschiedlichen SoC ergeben, werden die Ergebnisse je \dot{I} zu einem Durchschnittswert \bar{B} und \bar{n} (\times in Abb. 4.9) zusammengefasst.

$$\begin{aligned}\bar{B}(\dot{I}) &\approx B_0 + B_1 \log_{10}(\dot{I}) \\ \bar{n}(\dot{I}) &\approx n_0 + n_1 \log_{10}(\dot{I})\end{aligned}\tag{4.3}$$

Abb. 4.9 enthält logarithmische Trendlinien $\bar{B}(\dot{I})$ gemäß Gl. (4.3) zur Basis 10 über \dot{I} mit der Steigung B_1 mit dem Ordinatenabschnitt B_0 durch alle Mittelwerte \bar{B} eines Prüflingstyps. Mit $B_0(I = 10^0)$ wird der Ordinaten Schnittpunkt in der Mitte des untersuchten Intervalls von \dot{I} gewählt und stellt auch den Mittelwert aller Werte B einer Versuchsreihe dar. Die Notation und Abhängigkeiten gelten analog für n . B_0 und n_0 quantifizieren somit einen Basiswert für die Verfestigung, wogegen sich über B_1 und n_1 die Sensitivität bzgl. der Deformationsgeschwindigkeit beurteilen lässt.

In Tab. 4.4 werden die Trendlinienparameter für alle untersuchten Prüflinge je Szenario gegenübergestellt. Neben der visuellen Beurteilung anhand Abb. 4.9 ermöglicht dies den quantitativen Vergleich der Ergebnisse.

Es lässt sich feststellen, dass Prüflinge innerhalb einer spezifischen Energiedichte L_* und H_* im identischen Belastungsszenario in etwa identische Verfestigungscharakteristika aufweisen. Im Vergleich L_* zu H_* besitzt B_0 in beiden Szenarien bei höherer Energiedichte etwa 50 % höhere Werte und die Intrusionsratenabhängigkeit B_1 ist etwa 25 % höher. n_0 fällt für H_* etwa 10 % geringer aus und n_1 nimmt vergleichbare Werte an.

Der anhand Abb. 4.8 (b) bereits erläuterte, geringere Deformationswiderstand der trockenen Zellen T_m in Szenario S äußert sich in signifikant geringeren Werten für B_0 und B_1 bei deutlich höheren Werten für n_0 und n_1 . Für Szenario U ergeben sich die Aufpunkte der Trendlinien $B_{0,U}$ und $n_{0,U}$ vergleichbar zu funktionierenden Zellen. Die Sensitivität aller Parameter gegenüber der Intrusionsrate scheint bei trockenen Zellen signifikant geringer ausgeprägt zu sein.

4.4.2. Versagen

Die kritischen Parameter I_c und F_c stellen ein Maß für die Höhe der Belastung und Verformung dar, die eine Zelle erträgt, bevor ein kritischer Zustand erreicht wird. Die Abhängigkeit dieser Parameter von Szenario, Intrusionsrate, SoC und Komponentenreife ist daher von größter Bedeutung für die Beurteilung von Deformationen. Abb. 4.10 zeigt die gemessenen kritischen Parameter sowie deren Mittelwerte \bar{I}_c und \bar{F}_c als Funktion der Intrusionsrate für exemplarische Versuchsreihen in allen Szenarien.

Für I_c ist analog zu den Verfestigungswerten keine signifikante Separation in Abb. 4.10 (a) bis (d) der Messwerte bei unterschiedlichen SoC identifizierbar. F_c weist in Abb. 4.10 (a) etwa um 20 % unterschiedliche Werte für die Prüflinge H_p mit unterschiedlichem SoC für die beiden höchsten Intrusionsraten auf. Dieses Phänomen tritt identisch, jedoch in umgekehrter Relation zum SoC für die Zellen H_m auf. Unter Vernachlässigung der genannten, geringfügig unterschiedlichen kritischen Kräfte wurde eine Normalverteilung von I_c und F_c angenommen, deren Standardabweichungen s berechnet und $3s$ -Intervalle um die Mittelwerte in Abb. 4.10 (a) bis (d) dargestellt.

Die Messwerte in Abb. 4.10 (a) von I_c und F_c nehmen logarithmisch mit steigender $\dot{I} < 10^1 \text{ s}^{-1}$ ab. Für die höchste Intrusionsrate ist ein Anstieg beider Versagensparameter zu erkennen.

Im Gegensatz zu den anderen in Abb. 4.10 dargestellten Auswertung nehmen die Versagenswerte Abb. 4.10 (b) bei den Prüflingen T_m mit der Dehnrate zu.

Die Versagensparameter in Abb. 4.10 (c) für Szenario Z zeigen grundsätzlich ein vergleichbares Verhalten wie im ebenfalls normal zur laminaren Struktur belasteten Szenario S, wenngleich die Werte für F_c signifikant höher sind. Für die höchste Intrusionsrate ist eine deutlich gestiegene Streuung für I_c zu identifizieren.

Die Ergebnisse in Abb. 4.10 (d) für Szenario U zeigen etwa gleiche Versagensbedingungen bezüglich I_c für alle Intrusionsraten, da die Mittelwerte innerhalb eines Intervalls von 5 % liegen.

In Abb. 4.11 ist ein Vergleich der statistischen Werte der kritischen Parameter I_c und F_c für die Szenarien S und U für alle Probenotypen dargestellt. Im Gegensatz zu Abb. 4.10 (a) - (d) werden lediglich die unteren $3s$ -Werte dargestellt, die als Konfidenzniveau von 99,7 % zu interpretieren sind, keinen kritischen Zustand zu erreichen. Dieses Sicherheitsniveau dient innerhalb dieser Arbeit zur exemplarischen Diskussion und Veranschaulichung. Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt, besitzt die Gefährdungsvermeidung höchste Priorität. Die Werte von $\bar{I}_c - 3s$ bzw. $\bar{F}_c - 3s$ werden mit Gl. (4.4) analog zu den Verfestigungsparametern in Abschnitt 4.4.1 mit Trendlinien $I(\dot{I})$ bzw. $F(\dot{I})$ approximiert.

$$\begin{aligned} I(\dot{I}) - 3s &\approx I_0^* + I_1 \log_{10}(\dot{I}) \\ F(\dot{I}) - 3s &\approx F_0 + F_1 \log_{10}(\dot{I}) \end{aligned} \quad (4.4)$$

Der sich ergebende Ordinatenschnittpunkt I_0^* wird nach Gl. (4.5) anschließend derart verschoben, dass die Trendlinie bei gleicher Steigung durch den geringst gelegenen Wert $\bar{I}_c(\dot{I}_i) - 3s$ verläuft, sodass für jede Faktorstufe \dot{I}_i der Intrusionsrate das Konfidenzniveau von mindestens 99,7 % gewahrt bleibt.

$$I_0 = I_0^* - \max(I(\dot{I}_i) - (I_c(\dot{I}_i) - 3s(\dot{I}_i))) \quad \text{mit } i = 1, \dots, 4 \quad (4.5)$$

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

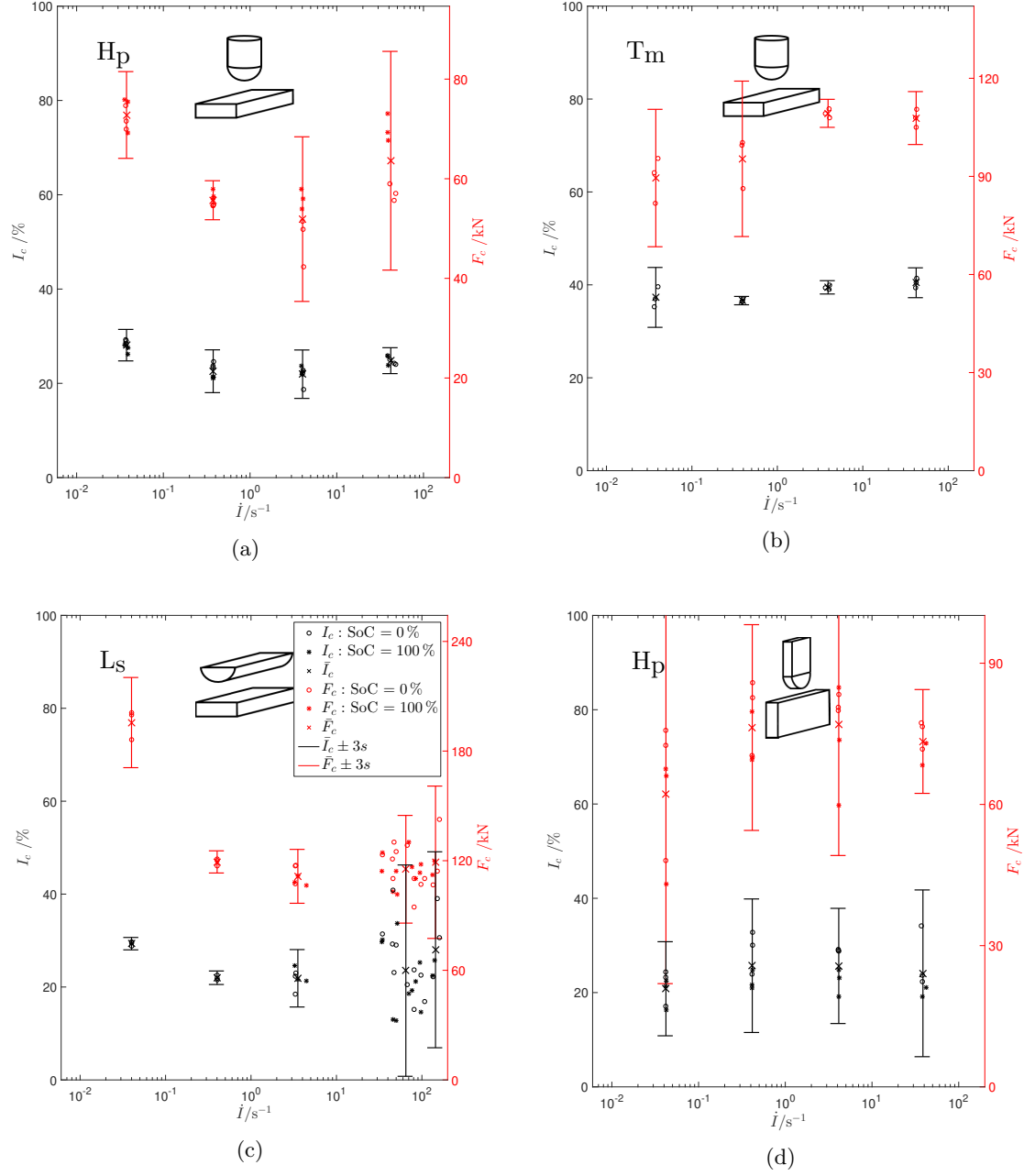
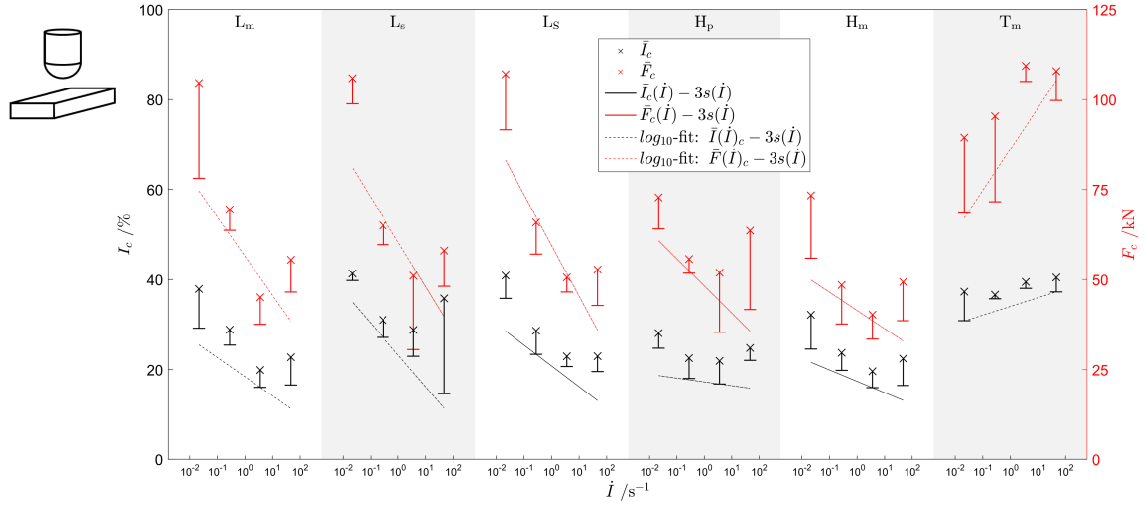
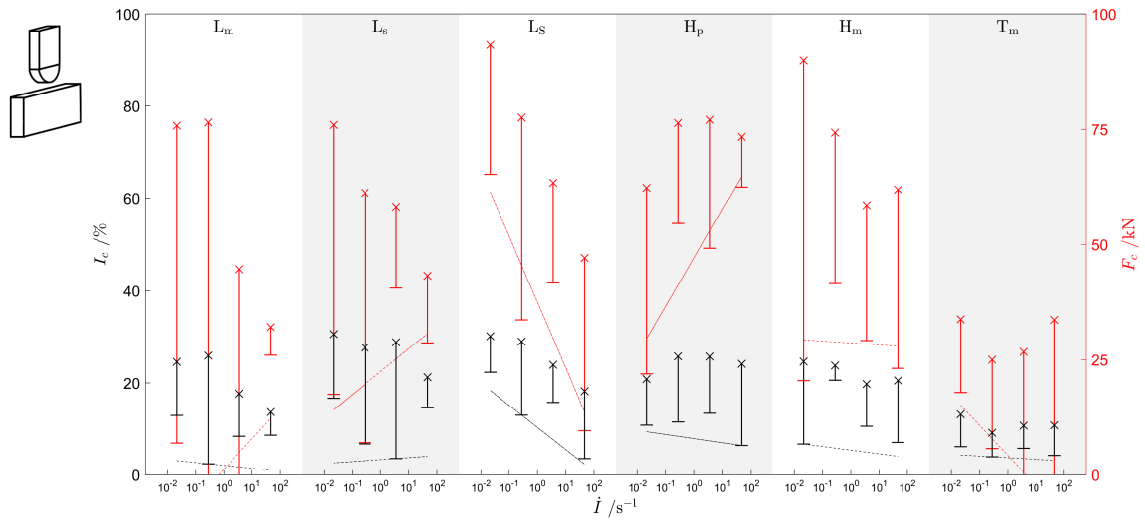


Abb. 4.10.: Mess- und Durchschnittswerte sowie dreifache Standardabweichungen s der kritischen Intrusionen I_c und Deformationskräfte F_c als Funktion der Intrusionsrate \dot{I} in ausgewählten Szenarien.



(a)



(b)

Abb. 4.11.: Durchschnittswerte, negative dreifache Standardabweichungen s und deren Trendlinie von kritischer Intrusion I_c und Deformationskraft F_c als Funktion der Intrusionsrate \dot{I} in Szenario S und U.

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

Tab. 4.5.: Gegenüberstellung der Trendlinienparameter zur Approximation der Abhängigkeit $\bar{I}_c - 3s$ und $\bar{F}_c - 3s$ in Prozent.

Szenario	$I_c(\dot{I})$ bzw. $F_c(\dot{I})$			L_m	L_s	L_S	H_p	H_m	T_m
S	$I_{0,S} + I_{1,S} \log_{10}(\dot{I})$	mit	$I_{0,S}$	18,4	22,2	20,8	17,3	17,4	35,5
			$I_{1,S}$	-4,7	-7,8	-5,1	-0,9	-2,8	2,2
	$F_{0,S} + F_{1,S} \log_{10}(\dot{I})$	mit	$F_{0,S}$	56,4	60,4	59,5	48,2	41,4	86,2
			$F_{1,S}$	-12,1	-31,8	-15,7	-8,4	-5,6	-12,7
U	$I_{0,U} + I_{1,U} \log_{10}(\dot{I})$	mit	$I_{0,U}$	2,0	3,3	9,7	7,9	5,6	3,3
			$I_{1,U}$	-0,7	0,5	-5,4	-1,0	-0,9	-0,4
	$F_{0,U} + F_{1,U} \log_{10}(\dot{I})$	mit	$F_{0,U}$	1,16	22,4	37,5	47,1	28,6	4,2
			$F_{1,U}$	7,45	5,5	-15,8	11,7	0,5	-7,3

I_0 stellt den entsprechend verringerten Aufpunkt der Trendlinie dar und ist mit I_1 , F_0 und F_1 in Tab. 4.5 zusammengestellt.

Abb. 4.11 (a) und (b) illustrieren deutlich unterschiedliche Versagenskonditionen für die untersuchten Belastungsrichtungen. Während für Szenario S relativ geringe Streuungen der Messwerte und gleichartige Trendlinien erkennbar sind, ergeben sich in Szenario U signifikante Varianzen der Messwerte und Tendenzen sind nicht zu erkennen. Festzustellen ist anhand Tab. 4.5, dass in Szenario U für alle Zelltypen Werte $I_{0,U} < 10\%$ ergeben und ausgenommen L_S mit $I_{1,U} \leq 1\%$ keine signifikante Abhängigkeit von \dot{I} existiert. Zu $F_c(\dot{I})$ kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. Die Prüflinge T_m versagen etwa bei 50 % der Intrusion und notwendigen Deformationskraft ihres Äquivalents mit Elektrolyten.

Gegensätzlich hierzu zeigen sich in Szenario S sowohl für \bar{I}_c als auch F_c reproduzierbare Tendenzen. Bezüglich der Standardabweichungen ergibt sich unabhängig von \dot{I} eine hohe Reproduzierbarkeit für beide Versagensparameter. Die funktionierenden Zellen weisen einen logarithmischen Abfall von I_c und F_c für steigende Intrusionsraten $\dot{I} < 10^1 \text{ s}^{-1}$ auf, dem ein Anstieg für $\dot{I} > 10^1 \text{ s}^{-1}$ folgt. Bemessen an I_0 , I_1 , F_0 und F_1 in Tab. 4.5 ergeben sich innerhalb einer spezifischen Energiedichte in etwa identische Versagensparameter trotz ansteigender Komponentenreife. Die höhere spezifische Energiedichte und der Übergang von Serien- zur Prototypenfertigung äußern sich in etwas geringeren Werten I_0 und F_0 als auch einer geringeren Sensitivität gegenüber \dot{I} bemessen an I_1 und F_1 .

4.4.3. Deformationsverhalten

Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen von der Vorderseite der Prüfkammer ermöglichen eine weitere Analyse der Experimente. Je nach Versuchsaufbau lassen sich Rückschlüsse auf das Verformungsverhalten und den Versagensmodus des Zellgehäuses und des Zellinneren ziehen, wodurch sich die Erkenntnisse aus der datenbasierten Analyse der vorangegangenen Abschnitte ergänzen lassen. Im Falle der im Stand der Technik dargestellten idealen Kompressibilität wäre das Aktivmaterial ohne seitliche Ausdehnung zu komprimieren.

In allen folgenden Unterabschnitten sind die Abbildungen für $I = 0$ mittels des Kontaktzeitpunkts t_0 durch die in Abschnitt 4.1.3 erläuterten Kontaktfolien ermittelt. Die nachfolgenden Abbildungen für höhere Intrusionen sind den Videoaufzeichnungen durch

Ermittlung des Zeitstempels t der synchronen Daten anhand der zugehörigen Werte für I entnommen.

Volumetrische Approximation der Szenarios Z

In Szenario Z besitzt die Videoanalyse den Vorteil, dass eine querschnittsähnliche Perspektive geboten wird. Abb. 4.12 zeigt Aufnahmen des Zeitpunktes des Berstens der Zellgehäuse aus Tests mit fünf verschiedenen Intrusionsraten. In allen Fällen versagt die Siegelnaht, die das Unterteil des Zellgehäuses mit der Deckplatte verbindet, bei identischen relativen Intrusionen von etwa 40 %. Alle Werte für I_c der Versuche in Abb. 4.10 (c) sind geringer als die dargestellten Berstintrusionen. Die Zellen befinden sich folglich alle bereits in kritischem Zustand mit vorliegendem Kurzschluss. Ein dadurch potentiell entstehender Gasdruck würde die Zellen aufblähen und die Berstmembranen der Zellen öffnen, die bei Post-Test-Analysen als intakt befundet wurden. Folglich resultiert das beobachtete Bersten des Zellgehäuses durch einen mechanischen Druck des deformierten Zellinneren, dessen Kompressibilität in diesem Fall als begrenzt anzusehen wäre.

Um eine quantifizierte Abschätzung der Kompressibilität zu erhalten, dient ein Vergleich des freien Volumens innerhalb der Zelle mit dem durch die Deformation verdrängten Volumens, das anhand der verformten Silhouette der Zelle abgeleitet wird. Die verformte Gestalt des Gehäuses $w(r, I = 40\%)$ wird unter Verwendung von zwei gleichen Radien R approximiert. Abb. 4.12 zeigt unten links eine Skizze, die für die geometrische Beschreibung der Verformung verwendet wird. $R_\alpha(I)$ stellt die Entfernung des Wendepunkts der Eindrückkontur entlang der Richtung r dar und bei $2R_\alpha(I)$ ist der Übergang auf das unverformte Zellgehäuse lokalisiert.

$$w(r, I) = \begin{cases} I - \left(R_I - \sqrt{R_I^2 - r^2}\right) & \text{für } 0 \leq r \leq R_\alpha(I) \\ R_I - \sqrt{R_I^2 - [R_\alpha(I) - r]^2} & \text{für } R_\alpha(I) < r \leq 2R_\alpha(I) \end{cases} \quad (4.6)$$

Das verdrängte oder deformierte Volumen V_d wird in Gl. (4.7) durch Integration der geometrischen Form der Oberseite des deformierten Prüflings $w(r, I)$ entlang des Radius r und in der Projektionsebene l berechnet. Das ermittelte Volumen V_d wird anschließend aufgrund der externen Beobachtbarkeit in den Aufnahmen anhand der äußeren Dimensionen der Zelle L , H und T normiert.

$$V_d(I = 40\%) = 2 \int_0^L \int_0^{2R_\alpha} w(r, I = 40\%) dr dl \approx 0.125 \cdot H \cdot L \cdot T \quad (4.7)$$

$$V_f = (1 - 0.8) \cdot H \cdot c_L \cdot L \cdot c_T \cdot T \approx 0.158 \cdot H \cdot L \cdot T \quad (4.8)$$

c_L und c_T sind Korrekturfaktoren für die Subtraktion der Blechdicken des Zellgehäuses von den Außenmaßen. Die Dicke der Deckplatte, der diversen Zusatzkomponenten und der Blechdicke des Bodens des Zellgehäuses sind bereits im Faktor von 0,80 enthalten. Vergleicht man V_d und V_f entspricht der verbleibende Unterschied zwischen Gl. (4.7) und Gl. (4.8) ungefähr dem Volumen der Hilfskomponenten, Stromabnehmer, etc. (vgl. Abb. 4.1), die aus inkompressiblen Materialien bestehen, d.h. Aluminium(-folie), Kupfer(-folie) und Kunststoff.

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

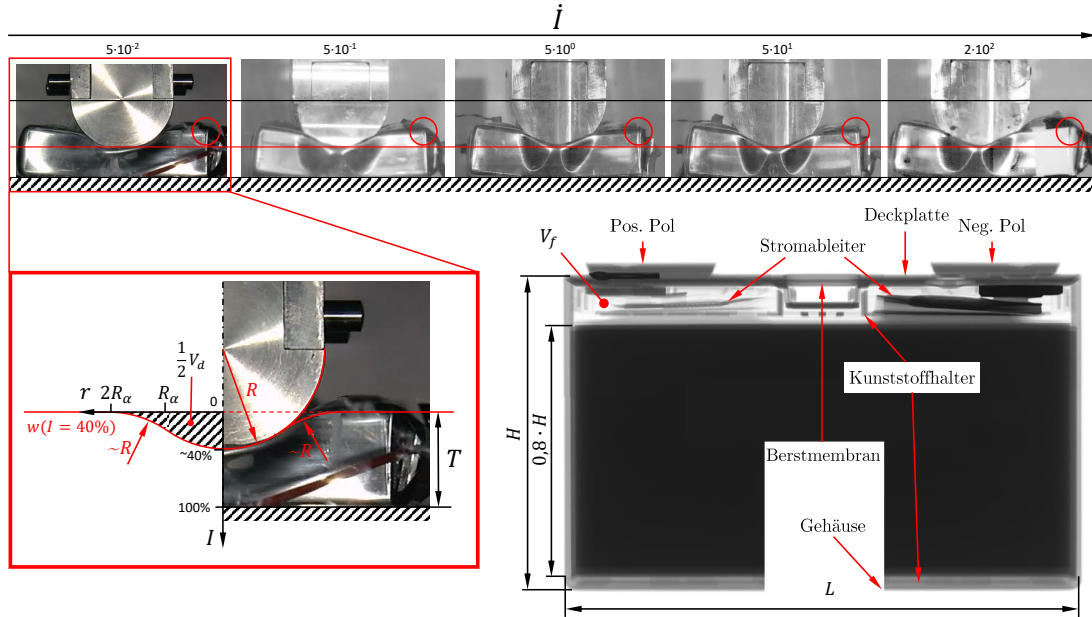


Abb. 4.12.: Oben: Intrusionen bei Versagen der Siegelnaht über vier Größenordnungen von \dot{I} . Unten links: Geometrische Skizze der deformierten Zellsilhouette im Versagemoment. Unten rechts: Tomogramm einer neuwertigen Zelle L_s .

Da V_d kleiner oder höchstens gleich dem Volumen ist, das das Zellinnere im Moment des Berstens die Möglichkeit der Ausdehnung besitzt, kann aufgrund der Volumenkonstanz eine näherungsweise Inkompressibilität gefolgert werden. Diese Annahme wird dadurch bestärkt, dass die Zellen mit zunehmenden Intrusionsraten eine nach außen gewandte Wölbung des in der Approximation als unverformt angenommenen Bereichs des Zellgehäuses außerhalb $2R_\alpha(I)$ aufweisen. Die Näherung mit der dargelegten Deformationsgeometrie stellt folglich eine konservative Abschätzung dar.

Qualitative Beurteilung des Szenarios S

Abb. 4.13 zeigt Prüflinge H_p unter verschiedenen experimentellen Konditionen. Die Aufnahmen sind für jeweils identische Intrusionen und zunehmende Intrusionsraten angeordnet.

Bei Werten von $I \leq 10\%$ ist das Gehäuse nur lokal, direkt unter der auftreffenden Geometrie eingedrückt, während die restliche Oberseite der Zelle bei geringeren Intrusionsraten optisch flach bleibt. Für $\dot{I} \approx 40\%$ bildet sich eine torusförmige Mikrowölbung des Gehäuses um den Impaktor aus, die metaphorisch vergleichbar mit einem schmalen Kraterrand ist.

Höhere Intrusionsraten induzieren eine globale Wölbung des Gehäuses, wie bereits für Szenario Z in Abb. 4.12 dargelegt. Bei den geringsten \dot{I} tritt dies bei Intrusionen zwischen 30 % und 40 % auf. Dieses Phänomen zeigt eine Sensitivität bezüglich der Intrusionsrate. Die Wölbung tritt entsprechend der Markierungen in Abb. 4.13 mit einer ungefähren Differenz der Intrusionstiefe von 10 % je Größenordnung von \dot{I} auf. Bei den beiden höchsten

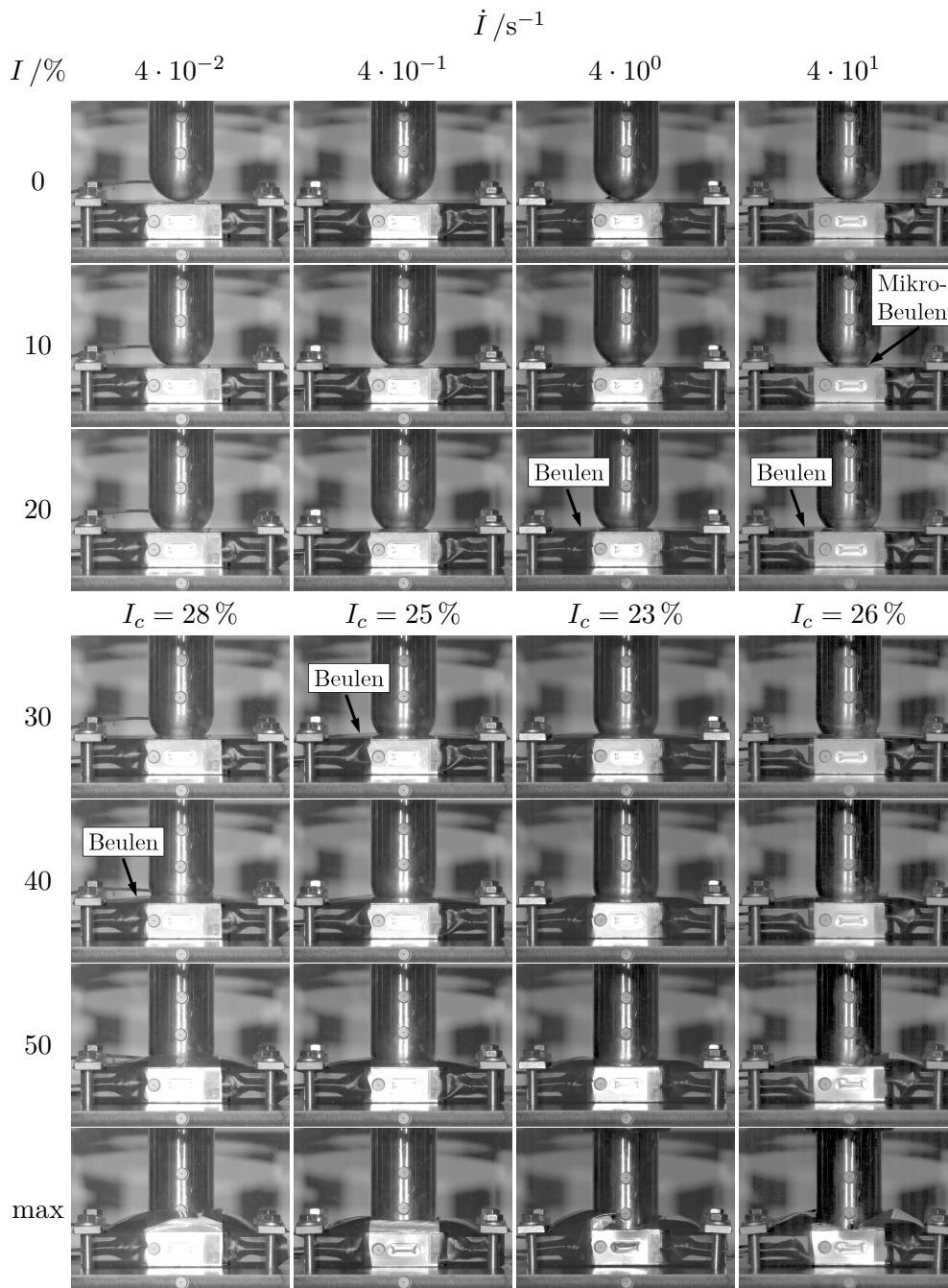


Abb. 4.13.: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei identischen Intrusionen je Faktorstufe von \dot{I} der Prüflinge H_p in Szenario S.

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

Intrusionsraten wird die Differenzierung minimal.

Das jeweils letzte Bild stellt die maximale Intrusion dar, die unmittelbar vor Erreichen der erforderlichen Kraft für die Schervorrichtung anliegt. Das Volumen der Wölbung akkumuliert sich bei $I = 50\%$ intrusionsratenunabhängig auf etwa die gleiche Größe.

Wie aus den eingetragenen I_c -Werten in Abb. 4.13 ersichtlich ist, tritt die Wölbung nach Erreichen des kritischen Zustands für die beiden geringsten Intrusionsraten auf. Zwischen jedem Bild in der Spalte für $\dot{I} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ vergehen mehr als zwei Sekunden seit dem zellinternen Kurzschluss ohne sichtbare exotherme Reaktion. Die Zeitspanne genügt der anfänglichen Entwicklung eines thermischen Ereignisses [1].

Für höhere Geschwindigkeiten genügt die Zeitspanne zwischen t_c und der maximalen Intrusion nicht, um ein thermisches Ereignis inklusive der zugehörigen, signifikanten Gasentwicklung zu produzieren. Die noch intakte Berstmembran und die Absenz von Rauch in allen Aufnahmen deuten an, dass kein thermisches Ereignis eingetreten ist. Zudem tritt das Phänomen der Wölbung für die beiden höchsten Intrusionsraten bereits vor Erreichen eines kritischen Zustands auf.

Die Einsicht ins Zellinnere durch die entstehenden Risse lässt weiterhin vermuten, dass die *Jellyroll* den notwendigen Druck zum Ausbeulen ausübt. Beides substantiiert eine abnehmende Kompressibilität des Zellinneren in Abhängigkeit von \dot{I} .

Phänomenologische Bewertung des Szenarios U

Abb. 4.14 zeigt einen Auszug aus den Experimenten in Szenario U analog Abb. 4.13. Die neue Perspektive ermöglicht eine detailliertere Sicht auf weitere Phänomene, die während der Verformung auftreten.

In Verbindung mit den beiden Spannplatten stanzt die Impaktorgeometrie aus dem Boden des Zellgehäuses einen Blechstreifen aus und trägt diesen ins Zellinnere. Da die Abmessung des Impaktors in horizontaler Richtung weniger als die Dicke der Zelle beträgt, verformen sich die vertikalen Blechteile des Zellgehäuses lediglich unwesentlich.

Der Vergleich der Einzelbilder in der zweiten Spalte mit der Tomographie in Abb. 4.12 lässt die Annahme zu, dass die Wickel trotz des Zusammenpressens der äußeren Metallplatten innerhalb der Zellgehäuse um die etwa 10 % bis 20 % der Zellhöhe H gleiten. Die geringfügige Bewegung der mit (A) markierten Zellpole erfolgt aufgrund des Beginns einer Krafteinwirkung auf diese. Bei $I = 20\%$ ist die Krafteinleitung voll ausgeprägt: Die innenliegenden Teile der Pole werden in die Wickel geschoben und die als Gegenlager fungierende Deckplatte wird nach außen gewölbt (B). Dies führt zu einem lokalen Eindringen in die gemäß Abschnitt 4.4.2 empfindlichste Belastungsrichtung der Zellen parallel zu ihren Wicklungen.

Bei Intrusionen, die mit (C) markiert sind, versagt die Siegelnaht. Vergleicht man das Ausmaß der Zellöffnung im Bereich der Schweißnaht ist ein zunehmendes Aufklaffen in Korrelation zur Intrusionsrate ersichtlich. Nach $I > 40\%$ wölbt sich das Zellgehäuse signifikant aus der Richtung der Bildebene heraus (D) und bei den höchsten Geschwindigkeiten platzt es anschließend vollständig auf (E).

Der Vergleich dieser Beobachtungen mit dem quasistatischen Fall $\dot{I} = 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ lässt auch bei paralleler Belastung auf eine eingeschränkte Kompressibilität in Abhängigkeit der Intrusionsraten schließen.

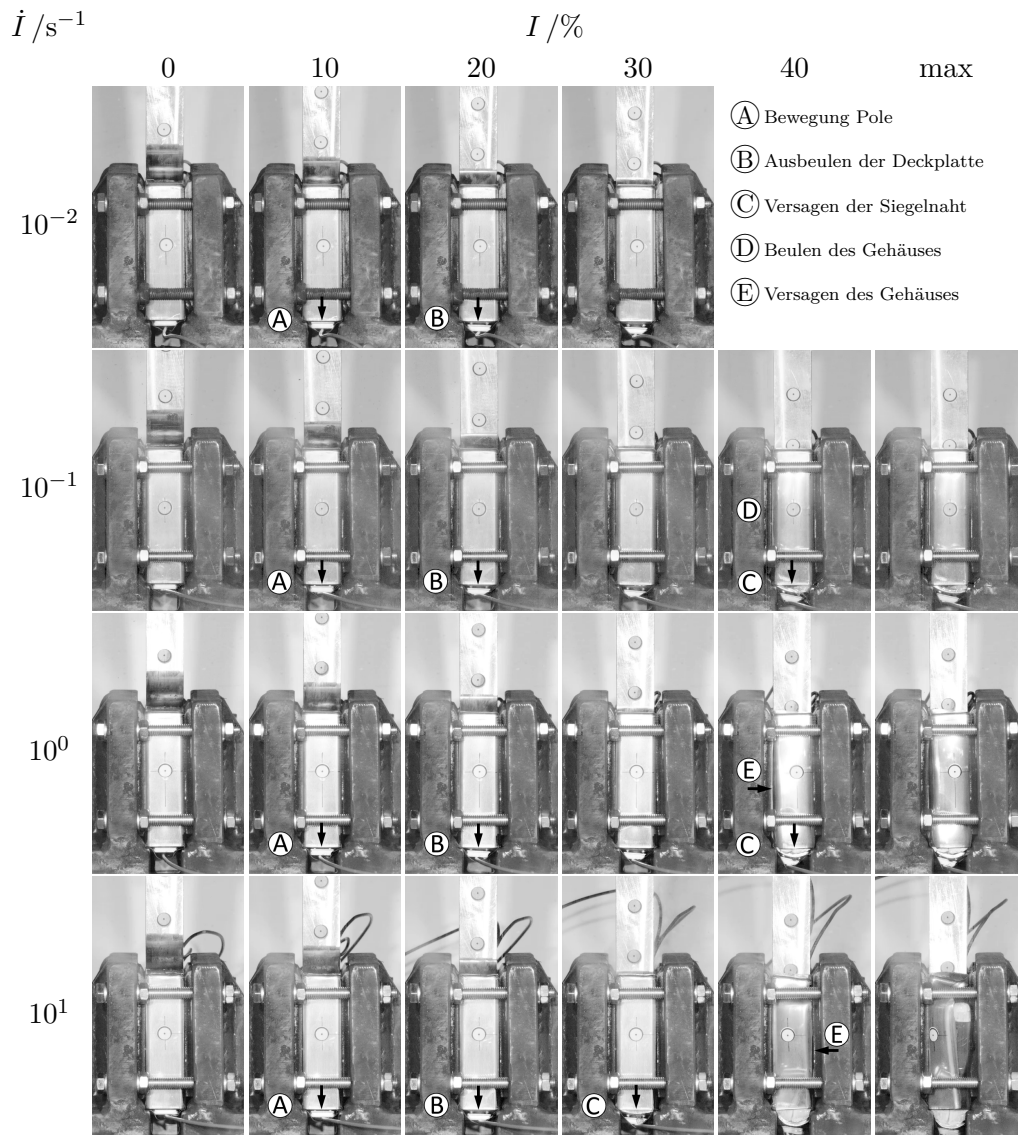


Abb. 4.14.: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei identischen Intrusionen je Faktorstufe von \dot{I} der Prüflinge H_p in Szenario U.

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

Tab. 4.6.: Qualitativer Überblick der identifizierten Phänomene in Relation zu den interessierenden Faktoren des Versuchsplans.

	Verfestigung $F \approx B \cdot I^n$	Deformationsverhalten ν_p	Versagen I_c, F_c
\dot{I}	$B \sim \log(\dot{I})$ $n \sim -\log(\dot{I})$	$\nu_p(\dot{I} \rightarrow 0) \approx 0$ $\nu_p \sim \dot{I}$ $\nu_p(\dot{I} > 10^1) \rightarrow 0,5$	$I_{c,S} \sim -\log(\dot{I})$ $I_{c,U} \approx 0$
Orthotropie	$n_{0,S} - n_{0,U} \approx 0,3$ $n_{1,S} - n_{1,U} \approx 0,07$	\emptyset	siehe \dot{I}
SoC	\emptyset	\emptyset	\emptyset
Zustand	$n_{0,S,\otimes} \approx 2n_{0,S}$	$\nu_p(T_m) \approx 0$	$I_{c,S,\otimes} \approx 2 \cdot I_{c,S}$ $F_{c,S,\otimes} \approx 2 \cdot F_{c,S}$ $I_{c,U,\otimes} \approx \frac{1}{2} \cdot I_{c,U}$ $F_{c,U,\otimes} \approx \frac{1}{2} \cdot F_{c,U}$
Komponenten- reife und Energiedichte	$B(L_*) \approx \text{const.}$ $n(L_*) \approx \text{const.}$ $B(H_*) \approx \text{const.}$ $n(H_*) \approx \text{const.}$ $\frac{B(H_*)}{B(L_*)} \approx 1,5$	\emptyset	$I_{c,S} \approx \text{const.}$

\emptyset	kein signifikanter Einfluss identifiziert
\approx	Approximation
\sim	Korrelation vorhanden
\otimes	Indexsymbol für Zellen ohne Elektrolyt
S	Indexsymbol für Ergebnisse aus Szenario S
U	Indexsymbol für Ergebnisse aus Szenario U
L_*	Prüfling niedriger spezifischer Energie
H_*	Prüfling hoher spezifischer Energie

4.5. Interpretation und Diskussion

Der folgende Abschnitt verknüpft die in diesem Kapitel ermittelten Ergebnisse mit dem Stand der Technik und diskutiert Kongruenzen sowie Unterschiede sowohl bezogen auf die experimentellen Aspekte als auch auf die in der Regel abgeleiteten mechanischen Modellierungsansätze. Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, korreliert das mechanische Verhalten von prismatischen Li-Ionen-Zellen mit den meisten der untersuchten interessierenden Faktoren. Tab. 4.6 fasst diese Ergebnisse in starker Vereinfachung qualitativ zusammen. Die Beschreibung der Variablen erfolgt möglichst generisch, wenn möglich in quantifizierter Näherung und Indizes schränken die Gültigkeit der jeweiligen Aussage oder Parameter ein. Im Anschluss daran wird in den jeweiligen Paragraphen eine detaillierte Diskussion und Interpretation geführt.

Verfestigung

Für das prismatische Zellformat zeigt sich ein neuartiges Verfestigungsverhalten bei höheren Intrusionsraten. Kongruent zur öffentlichen Literatur wird eine progressive Verfestigung für quasistatische Intrusionen identifiziert. Wie in Tab. 2.3 ersichtlich, wird in der gesamten Literatur ein progressives Verfestigungsgesetz nach Ludwik gemäß Gl. (2.19) für analytische Beschreibungsansätze oder FEM-Materialmodelle [53, 53, 54, 56, 60, 63, 64, 68] verwendet.

Dieser quasistatische Ansatz wird in der Literatur durch Multiplizieren mit einer Exponentialfunktion gemäß Gl. (2.30) [4, 56] oder des dynamischen Teils des Verfestigungsgesetzes nach Johnson-Cook gemäß Gl. (4.9) in Form einer logarithmischen Funktion erweitert [86]. In Gl. (4.9) stellen A , B , C und n Materialkonstanten sowie σ , ε_p , $\dot{\varepsilon}_p$, $\dot{\varepsilon}_0$ Spannung, plastische Dehnung, plastische Dehnrates und die in der Regel quasistatische Referenzdehnrates dar.

$$\sigma(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p) = \underbrace{\left(A + B\varepsilon_p^n\right)}_{\text{Ludwik}} \cdot \underbrace{\left(1 + C \frac{\ln(\dot{\varepsilon}_p)}{\ln(\dot{\varepsilon}_0)}\right)}_{\text{dyn. Johnson-Cook}} \quad (4.9)$$

Mit $A = 0$ oder $A \rightarrow 0$ für alle Ansätze in Tab. 2.3 [53, 54, 56, 60, 63, 64, 68] ist ein Verfestigungsgesetz analog Gl. (2.30) oder Gl. (4.9) für prismatische Zellen ein valider Ansatz, wenn

- (1) die gefundenen Verfestigungsparameter B eine exponentielle oder logarithmische Korrelation zu \dot{I} zeigen, die sich aus den multiplizierten, dynamischen Termen ergibt, und
- (2) n eine von \dot{I} unabhängige Konstante ist.

Anhand der in Abb. 4.9 dargestellten und Tab. 4.4 quantifizierten Verfestigungsparameter wird Prämisse (1) mittels der identifizierten Korrelation $B \sim \log(\dot{I})$ zumindest für einen Modellierungsansatz bestätigt. Prämisse (2) wird nicht erfüllt, da n mit der beobachteten logarithmischen degressiven Proportionalität zu \dot{I} mit den vorliegenden multiplikativen Formulierungen nicht abgebildet werden kann. Weiterführend genügt keines der Verfestigungsgesetze von Gl. (2.17) bis Gl. (2.23) in Abschnitt 2.4.2 der identifizierten Relation $n \sim -\log(\dot{I})$ und bildet den identifizierten Krümmungswechsel in den Verfestigungskurven adäquat ab. Folglich ist eine Erweiterung des Ansatzes mit einem dehnratenabhängigen Verfestigungsexponenten $n^*(\dot{\varepsilon})$ erforderlich, um dieses Phänomen zu erfassen.

Deformationsverhalten

In der Literatur wird die poröse Matrix des Wickels als metallische, schaumähnliche Struktur interpretiert und so wird das in Abschnitt 2.6 erläuterte *Crushable Foam* Modell [77] üblicherweise für mechanische FE-Simulationen verwendet [53, 54, 56, 60, 63, 64, 68], wie in Tab. 2.3 ersichtlich. Teil des Modells ist eine Fließregel mit einer plastischen Querkontraktionszahl $\nu_p = 0$, sodass sich eine ideale Kompressibilität einstellt. Wie aus Tab. 2.2 ersichtlich, wurde diese Schlussfolgerung anhand von phänomenologischen Beobachtungen basierend auf quasistatischen Deformationsversuchen getroffen [53, 56, 60, 63, 64, 68].

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

Im Rahmen von Abschnitt 4.4.3 werden verschiedene Einblicke hinsichtlich des makro-rheologischen Deformationsverhaltens gegeben, die eine ideale Kompressibilität in Frage stellen. In den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der quasistatischen Intrusionsraten wird die Hypothese $\nu_p(\dot{I} \rightarrow 0) \approx 0$ gestützt. Bei einer qualitativen Korrelation treten verschiedene Phänomene, die bei inkompressiblem Materialverhalten zu erwarten sind, mit zunehmender Intrusionsrate \dot{I} bei geringeren Intrusionen auf. Die vorgestellte visuelle Bewertung deutet einen Übergang von kompressiblem zu inkompressiblem Verhalten in allen Belastungskonfigurationen in Korrelation zu \dot{I} an. Diese lässt sich anhand der Versuchsergebnisse jedoch nicht quantitativ beschreiben. Für die höchsten untersuchten Geschwindigkeiten $\dot{I} > 10^1 \text{s}^{-1}$ scheint sich näherungsweise inkompressibles Verhalten mit $\nu_p \approx 0,5$ einzustellen.

Abschließend ist anhand der Ergebnisse festzustellen, dass eine ideal kompressible Fließregel für das zellinterne Materialverhalten im quasistatischen Bereich Gültigkeit eine gültige Annahme darstellt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass das volumetrische Deformationsverhalten im dynamischen Bereich nicht korrekt abgebildet wird.

Eine hypothetische Interpretation lässt sich anhand der Interaktion zwischen der porösen Matrix und dem in den Poren enthaltenen Elektrolyt formulieren. Der Elektrolyt füllt als inkompressible Flüssigkeit die Poren und muss verdrängt werden, bevor die Poren komprimiert werden können. Die Partikel der Matrix bestehen aus metallischen, ebenfalls inkompressiblem Material. Hydromechanische Wechselwirkungen wie Viskositäts- und Druckverlusteffekte beim Durchströmen der Matrix verändern das volumetrische Verhalten des Wickels erheblich, wenn der Elektrolyt während einer ausreichend schnellen Deformation nicht in der Lage ist die Poren zu verlassen. In diesem Fall reagiert der gesamte Verbund inkompressibel. Bei sehr geringen Geschwindigkeiten treten diese Phänomene vernachlässigbar auf. Anhand der im Rahmen der Arbeit durchgeführten makroskopischen Experimente lässt sich diese mikroskopische Hypothese jedoch nicht verifizieren.

Versagen

Die simulative Identifikation von kritisch deformierten und dadurch kurzgeschlossenen Bereichen innerhalb der Wickel erfolgt entweder über dehnungs- [63,68,88] oder spannungsbasierte [52,53,65,89] Ansätze. Aus den Erkenntnissen in Abschnitt 4.4.2 leitet sich die Notwendigkeit einer geschwindigkeitsabhängigen Bewertung zur Ergänzung dieser Ansätze ab, um zu berücksichtigen, dass die Intrudierbarkeit der Zellen mit zunehmender Deformationsgeschwindigkeit signifikant sinkt. Die vorgeschlagene probabilistische Auswertung ermöglicht es, bei einer Deformation ein Konfidenzniveau zu quantifizieren, innerhalb dessen kein thermisches Ereignis ausgelöst wird. Berücksichtigt man beide Ansätze, ist Tab. 4.5 zu entnehmen, dass sich die kritischen Intrusion I_c um bis zu 30 % je Größenordnung von \dot{I} bei Belastungen lateral zum laminaren Aufbau des Wickels reduzieren.

Aus Abb. 4.11 (b) und Tab. 4.5 geht eine hohe Sensitivität und Kritikalität gegenüber der Belastungsrichtung hervor. Das in der Literatur berichtete, instabile Knickverhalten bei wickelparalleler Intrusion [59–61,61,62] scheint sich in einer großen Varianz der Ergebnisse zu manifestieren. In Szenario U quantifiziert sich eine grundlegende, mittlere Intrudierbarkeit anhand $I_{0,U} \rightarrow 0\%$. Folglich erscheinen prismatische Zellen sehr empfindlich für Verformungen parallel zu den Lagen des Wickels, sodass diese mit geeigneten

Mitteln robust vermieden werden sollten.

Intrusionsrate

Die präsentierten Ergebnisse hinsichtlich Versagen, Verfestigungs- und Deformationsverhalten deuten auf die Existenz von drei Domänen hin, die von bestimmten geschwindigkeitsabhängigen Phänomenen dominiert werden.

Bei den geringsten, quasistatischen Intrusionsraten suggerieren die Ergebnisse insbesondere in Abb. 4.8 (c) lediglich geringe Unterschiede unterhalb und innerhalb des analysierten Intervalls $10^{-4} < \dot{I} < 10^{-2}$. Auf diese Domäne folgt ein stetiger Übergang eines veränderlichen dynamischen Verhaltens für $10^{-2} \leq \dot{I} \leq 10^1$, der in den vorangegangenen Abschnitten im Detail diskutiert wurde. Die höchsten $\dot{I} \geq 10^1$ zeigen komplexe Effekte, die schwer zu erklärende Phänomene aufweisen. Zum einen sei der reproduzierbare Anstieg der Versagensparameter I_c und F_c in Szenario S genannt, der im Widerspruch zur Tendenz unterhalb dieser Intrusionsrate steht. Zum anderen stellt sich ab einem nicht quantifizierbaren Grenzwert von \dot{I} eine Art Sättigungszustand bezüglich des volumetrischen Deformationshalten sein. Von einem möglichen Zusammenhang kann ausgegangen werden, jedoch kann dieser anhand des vorliegenden Messverfahrens und der Ergebnisse nicht bestätigt werden.

Die Berücksichtigung dieser den Domänen inhärenten Effekte ist essenziell, um experimentelle Ergebnisse zu bewerten, die aufgrund transienter Verformungsgeschwindigkeiten mehrere Größenordnungen von \dot{I} durchlaufen. Als Beispiel seien die Teilen der Literatur eingesetzten Fallturmversuche genannt, siehe Tab. 2.2.

Orthotropie

Die beschriebene Krümmung der Verfestigungskurven und deren Änderung über \dot{I} ist in Szenario U geringer ausgeprägt als in Szenario S. Dies wird durch die in der Regel geringeren Werte $n_{0,S} - n_{0,U} \approx 0,3$ und die ebenfalls geringeren Werten $n_{1,S} - n_{1,U} \approx -0,07$ ersichtlich. Unter Hinzunahme deutlich unterschiedlichen Verfestigungsparameter $B_{0,S} \approx 2B_{0,U}$ und $B_{1,S} \approx 2B_{1,U}$ ergeben sich, wie sich im Vergleich von Abb. 4.8 (a) und (d) ersichtlich, dennoch Verfestigungskurven auf ähnlichen Niveaus. Ein direkter Vergleich der Verfestigungsparameter beider verschiedenartiger Belastungsszenarien erscheint nicht sinnvoll, da sich die Verfestigungsparameter zu sehr unterscheiden und - wie gezeigt - gegenseitig ungefähr kompensieren können. Eine Bestätigung orthotropen Verfestigungsverhaltens kann aufgrund der Verschiedenartigkeit der Szenarien nur anhand jeweiliger Simulationen erbracht werden.

Unter Berücksichtigung der Fragilität der Zellen in Szenario U bemessen an $I_{c,U} \rightarrow 0$ für ein Konfidenzniveau von 3s muss der Bedarf einer orthotropen Modellierung ohnehin infrage gestellt werden. Wie beschrieben motiviert diese Belastungsgrenze die Vermeidung jeglicher Deformation.

Ladegrad

4. Experimentelle Analyse der Makrorheologie von Lithium-Ionen-Zellen

Die in der Literatur berichteten Unterschiede im mechanischen Verhalten von Lithium-Ionen-Zellen von etwa 20 % höheren Deformationskräften für $\text{SoC} = 100\%$ [22, 56] können für die untersuchten prismatischen Zellen nur teilweise bestätigt werden. Die Verfestigungsparameter sind unwesentlich und die Versagensparameter nur in Spezialfällen minimal vom SoC der Zelle beeinflusst, siehe Abb. 4.10 (a) und Abschnitt 4.4.2.

Zustand der Zellen

Die Untersuchung elliptischer Zellen [65] zeigte identische Verfestigungs- und Versagensbedingungen zu den hierin untersuchten Prüflingen T_m . Trockene Zellen weisen Verfestigungseigenschaften auf, die sich in Szenario S mit einer etwa doppelt so starken Krümmung als auch den Versagensparametern $I_{c,S,\otimes} \approx 2 \cdot I_{c,S}$, $F_{c,S,\otimes} \approx 2 \cdot F_{c,S}$, $I_{c,U,\otimes} \approx \frac{1}{2} \cdot I_{c,U}$ und $F_{c,U,\otimes} \approx \frac{1}{2} \cdot F_{c,U}$ signifikant von ihrem aktiven Gegenpart unterscheiden.

Wenngleich Zellen ohne Elektrolytzugabe den Vorteil besitzen, bei zerstörenden Analysen kein thermisches Ereignis auszulösen, unterscheidet sich das mechanische Verhalten substantiell vom Verhalten aktiver Zellen. Es fehlen präzise Ansätze um Versuchserkenntnisse trockener Zellen um den Einfluss des Elektrolyts transformieren zu können. Die gefundenen Relationen erlauben einen vagen Transfer des Verhaltens.

Produktreife

Porosität und Dicken der Wickelbestandteile zählen zu den wichtigsten Eigenschaften im elektrochemischen Zelldesign und sind eines der zentralen Forschungs- und Vorentwicklungsthemen [1, 29]. So kann davon ausgegangen werden, dass nach Beginn der Entwicklung einer industrialisierten Serienzelle lediglich geringfügige Optimierungen zu erwarten sind. Diese Größen bestimmen die Verfestigungseigenschaften einer Zelle maßgeblich, wobei insbesondere die Dicke des Separators die maximale Belastbarkeit determiniert [1, 4]. Näherungsweise identische Werte der Verfestigungs- und der Versagensparameter innerhalb eines spezifischen Energieinhalts wären die Folge. Tab. 4.4 und Tab. 4.5 zeigen, dass dies der Fall ist. Hierdurch wird impliziert, dass Li-Ionen-Zellen bereits in frühen Entwicklungsstadien und bei geringem Industrialisierungsgrad eine akzeptable Grundlage darstellen, um die Deformationseigenschaften zu analysieren.

Nach der Schlussfolgerung näherungsweiser Konstanz dieser geometrischen Einflussfaktoren ist die Qualität der Zellherstellung ein naheliegender Faktor. Sämtliche analysierte Ergebnisse in Szenario S besitzen für die Serienzelle L_S die geringste Varianz, wodurch die These des Qualitätseinflusses gestützt wird.

Für Szenario U überwiegen die aus dargelegten Gründen komplexen, nicht kontrollierbaren Phänomene vermutlich diesen Einfluss, sodass hier keine gesicherte Aussage getroffen werden kann.

4.6. Kernbotschaften zur experimentellen Studie

- I. Eine extensive Versuchsreihe mit Lithium-Ionen-Zellen identischen Zellformats, unterschiedlichen SoCs, ansteigender Komponentenreife, zwei spezifischen Energieinhalten, in jeweils unterschiedlichen Belastungsszenarien und konstanten Intrusionsraten wurde durchgeführt.
- II. Eine objektive Auswertungsmethode wird vorgeschlagen, mithilfe derer sowohl Datenanalyse als auch -vergleich anhand von zwei Verfestigungs- und zwei Versagensparametern möglich sind.
- III. Eine ausgeprägte Dehnratenabhängigkeit des Verfestigungsverhaltens, der Kompressibilität und das Versagens der Zellen wird identifiziert.
- IV. Das Verfestigungsverhalten lateral zu den Lagen des Wickels zeigt mit einem Krümmungswechsel bei einer bestimmten Intrusionsrate und einem etwaigen Schnittpunkt bei einer bestimmten Intrusion ein neuartiges Verhalten, das von geläufigen Modellen für Dehnratenabhängigkeiten nicht abgebildet wird.
- V. Die in der Literatur postulierte Kompressibilität besitzt nur im quasistatischen Bereich Gültigkeit. Ab Intrusionsraten die etwa 1 ms^{-1} entsprechen, wird näherungsweise inkompressibles Deformationsverhalten beobachtet.
- VI. Für die Beurteilung kritischer Beschädigungen sind die in der Literatur vorhandenen spannungs- und dehnungsbasierten Ansätze um eine Abhängigkeit von der Deformationsgeschwindigkeit zu erweitern.
- VII. Der Ladegrad hat unwesentlichen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und Versagenskonditionen.
- VIII. Die mittleren Verfestigungsparameter weisen keine signifikante Sensitivität gegenüber der Komponentenreife auf. Dies impliziert die Eignung früher Prototypen zur mechanischen Analyse.
- IX. Die Varianz der Versagensparameter verringert sich mit zunehmender Fertigungsqualität der Zellen.
- X. Die Zellen weisen eine signifikante Fragilität gegenüber lagenparalleler Belastung auf, welche die Notwendigkeit einer zwingenden Deformationsvermeidung zur Erhaltung eines akzeptablen Sicherheitsniveaus suggeriert. In Bezug auf die Zielsetzung bedeutet dies, dass kein volumetrisches und gravimetrisches Potential für eine Beaufschlagung aus Richtung U existiert.

5. Phänomenologisch basierte Modellierung des dynamischen Deformationsverhaltens

Ziel dieses Kapitels ist die Entwicklung eines Materialmodells, das die im vorangegangenen Kapitel identifizierten Phänomene adäquat abbildet. Um ein theoretisches Verständnis zu schaffen, erfolgt zunächst eine quasistatische, analytische Formulierung, die in einem hypothetischen, dehnratensensitiven Verfestigungsgesetz resultiert. Anschließend werden weitere Annahmen und Schlussfolgerungen zu Fließkriterium und Fließregel aus dem Stand der Technik und den experimentellen Erkenntnissen abgeleitet.

Nach der grundlegenden Erläuterung des FE-Modells wird die Parametrisierung anhand eines Versuchsplans (engl. *design of experiments*) (DoE) und RSM beschrieben. Die Quantifizierung der Prognosegüte des Materialmodells anhand einer Simulation der experimentellen Versuchsparameter, insbesondere der Intrusionsgeschwindigkeiten, schließt die Modellbildung mit deren Validierung ab.

Die Beurteilung eines kritischen Deformationszustands wird abschließend mittels eines probabilistischen Ansatzes unter Berücksichtigung der kritischen Intrusionen und der Intrusionsraten vorgenommen.

Im Rahmen dieses Kapitels werden lediglich die Szenarien S und Z betrachtet. Die Versagenskonditionen in Szenario U legen anhand der experimentellen Daten dar, dass zur Erhaltung eines akzeptablen Sicherheitsniveaus eine Deformationsvermeidung der Zellen notwendig ist. Im Vergleich zum geringen ausweisbaren Potenzial überwiegt das damit verbundene Risiko. Folglich genügt zur Auslegung eine kinematische Betrachtung, über die eine unzulässige Beaufschlagung detektierbar ist.

5.1. Analytische Problemformulierung

5.1.1. Prinzip der virtuellen Arbeit

Das Prinzip der virtuellen Arbeit ist ein Ansatz zur Beschreibung mechanischer Probleme. Es beinhaltet die Trennung aller Energieterme in externe Arbeit, die dem System zufließt, und dessen Reaktion in Form innerer oder kinetischer Energien nach Gl. (5.1).

$$\delta W_{ext} = \delta W_{int} + \delta W_{kin} \quad (5.1)$$

Gl. (5.1) kann in eine räumliche Notation Gl. (5.2) umformuliert werden [53, 72]. Die Verschiebungen \mathbf{u} und Beschleunigungen $\ddot{\mathbf{u}}$ stellen die kinematische Beschreibung des Systems dar. Neben den von außen wirkenden Belastungen \mathbf{t} an der Systemgrenze S seien vorhandene Beschleunigungsfelder durch Körperkräfte \mathbf{b} innerhalb des Systemvolumens V berücksichtigt. Im Gleichgewicht hierzu stehen die innere Arbeit $\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}$ und kinetische Energie im System, die neben der Kinematik von der Dichte ρ bestimmt wird.

$$\underbrace{\int_S \mathbf{t} \cdot \delta \mathbf{u} \, dS + \int_V \mathbf{b} \cdot \delta \mathbf{u} \, dV}_{\delta W_{ext}} = \underbrace{\int_V \boldsymbol{\sigma} : \delta \boldsymbol{\varepsilon} \, dV}_{\delta W_{int}} + \underbrace{\int_V \rho \ddot{\mathbf{u}} \delta \mathbf{u} \, dV}_{\delta W_{kin}} \quad (5.2)$$

5.1.2. Anwendung auf den quasistatischen Lastfall

Für die quasistatische Problembeschreibung werden zunächst einige Vereinfachungen getroffen. Es wird angenommen, dass die einzig wirkende Körperkraft die vernachlässigbare Gravitation darstellt. Somit ergibt sich $\mathbf{b} = 0$. Durch die quasistatische Betrachtung entfällt der kinetische Teil von Gl. (5.2).

Abb. 5.1 zeigt anhand eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme eine nicht näher bestimmte Intrusion und eine Skizze des Verformungsbildes der Zelle. Die kinematische Beschreibung des Experiments erfolgt durch Annäherung an den Umriss der deformierten Zelle zum Zeitpunkt t . Hierzu wird ein Koordinatensystem definiert, bei dem h lateral zum laminaren Aufbau des Zellinneren und parallel zur Intrusionsrichtung liegt. Die beiden anderen Richtungen r und l sind parallel zur Schichtstruktur der Zelle, wobei l parallel zur Achse des zylindrischen Prüfkörpers liegt.

Es ist festzustellen, dass sich ein näherungsweise symmetrisches Deformationsbild ergibt. Die Bereiche abseits der Deformation erscheinen näherungsweise planar. Es wird angenommen, dass die Außenseite der Zelle im Kontaktbereich mit dem Impaktor koinziiert und folglich eine zylindrische Form mit Radius R annimmt. Der Übergangsbereich zwischen der Deformation und dem näherungsweise planaren Bereich wird ebenfalls durch zwei Zylindersegmente mit identischem Radius R und jeweils tangentialem Übergang angenähert. Der Wendepunkt beider Radien tritt im Schnittbild unter dem Winkel $\alpha(t)$ auf. Die Entfernung entlang der r -Richtung wird mit $R_\alpha = R \cdot \sin(\alpha(t))$ bezeichnet. Die lokale Oberflächen deformation $w_{hh}(t, r, l)$ ergibt sich gemäß Gl. (5.3).

$$w_{hh}(t, r, l) = \begin{cases} d(t) & \text{für } r = 0 \\ d(t) - \left(R - \sqrt{R^2 - r^2}\right) & \text{für } 0 < r \leq R_\alpha \\ R - \sqrt{R^2 - (R_\alpha - r)^2} & \text{für } R_\alpha < r \leq 2R_\alpha \\ 0 & \text{für } r > 2R_\alpha \end{cases} \quad (5.3)$$

Die Oberflächenlast $\bar{\mathbf{t}}$ kann als verteilte Last $F^*(r, l, t)$ beschrieben werden. Gl. (5.4) zeigt das zu lösende Integral über die deformierte Oberfläche. Da die einzig verbleibende, dem System zugeführte Energie durch den Verformungsvorgang eingebracht wird, ergibt sich die Lösung des Integrals zum Produkt der Deformationskraft $F(t)$ mit dem zurückgelegten Weg des Impaktors $d(t)$.

$$\int_S \mathbf{t} \cdot \mathbf{u} \, dS = \int_0^L \int_0^{2R_\alpha} F^*(t, r, l) \cdot w(t, r, l) \, dr \, dl = F(t) \cdot d(t) \quad (5.4)$$

Die obere kinematische Randbedingung ergibt sich nach Gl. (5.3). Die untere Grenze $u(t, r, h = 0)$ wird aufgrund der Festlagerung der Prüflinge als Nullverschiebung definiert. Unter Annahme eines linearen Verschiebungsfelds entlang der h -Richtung binnen beider Grenzen ergibt sich die Verschiebung $u_{hh}(t, r, l, h)$ innerhalb des deformierten Bereichs zu

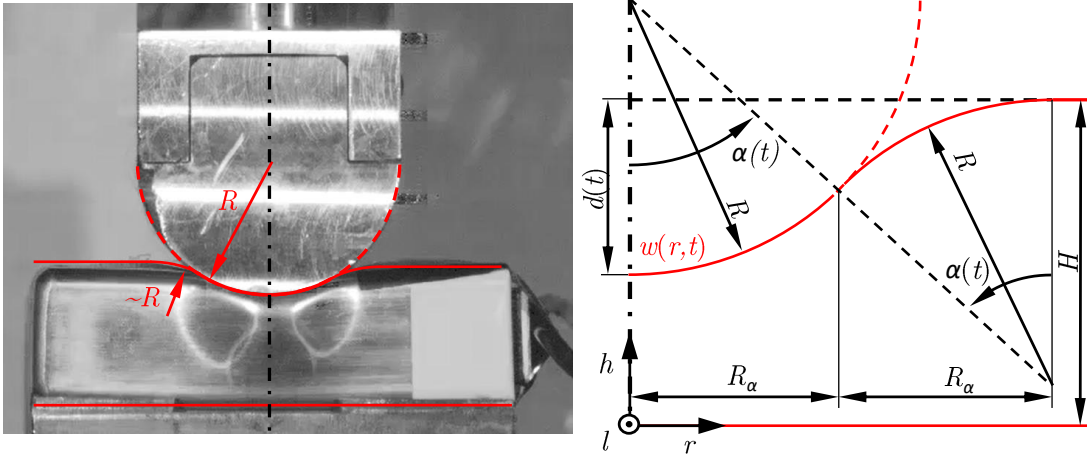


Abb. 5.1.: Ausschnitt aus einem Hochgeschwindigkeitsvideo und geometrisch abgeleitete Vereinfachung zur analytischen Beschreibung.

$$u_{hh}(t, r, l, h) = w(t, r, l) \cdot \frac{h}{T}. \quad (5.5)$$

Diese lineare Korrelation impliziert eine konstante, homogene Dehnung über die Dicke T , die gegeben ist durch

$$\varepsilon_{hh}(t, r, l) = \frac{w(t, r, l)}{T}. \quad (5.6)$$

Nachdem die Beobachtungen im Stand der Technik [53, 59, 64, 68] und die analogen Erkenntnisse in Kapitel 4 eine ideale Kompressibilität im quasistatischen Bereich suggerieren, wird für die analytische Beschreibung eine Querkontraktionszahl $\nu = 0$ angenommen. Gemäß Gl. (2.10) ergeben sich in diesem Fall Dehnungswerte mit Index r und l lateral zur Belastungsrichtung zu Null. Der Verzerrungszustand ε vereinfacht sich dadurch zu

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{hh} & \varepsilon_{hr} & \varepsilon_{hl} \\ \varepsilon_{rh} & \varepsilon_{rr} & \varepsilon_{rl} \\ \varepsilon_{lh} & \varepsilon_{lr} & \varepsilon_{ll} \end{bmatrix} \stackrel{\nu=0}{=} \begin{bmatrix} \varepsilon_{hh}(t, r, h) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.7)$$

Durch den einaxialen Dehnungszustand reduziert sich die zu lösende Gleichung zu

$$F(t) \cdot d(t) = \int_0^H \int_0^L \int_0^{R_\alpha} \sigma(\varepsilon(t, r), \dot{\varepsilon}(t, r)) \cdot \varepsilon \, dr dl dh. \quad (5.8)$$

Der essentielle verbleibende Bestandteil ist der Spannungszustand σ , zu dessen Bestimmung ein Verfestigungsgesetz zu definieren ist. In Anlehnung an die Verfestigungsgesetze in Tab. 2.3 und die progressiven Verfestigungskurven in Abb. 4.8(c) wird für den quasistatischen Lastfall eine Formulierung nach Ludwik gewählt. In Anbetracht der relativ großen, interessierenden Verformung wird der elastische Bereich vernachlässigt und somit ergibt sich nach Gl. (2.6) $\varepsilon = \varepsilon_p$.

$$\sigma_y(\varepsilon_p) = B \cdot \varepsilon_p^{n_0} \quad (5.9)$$

5. Phänomenologisch basierte Modellierung des dynamischen Deformationsverhaltens

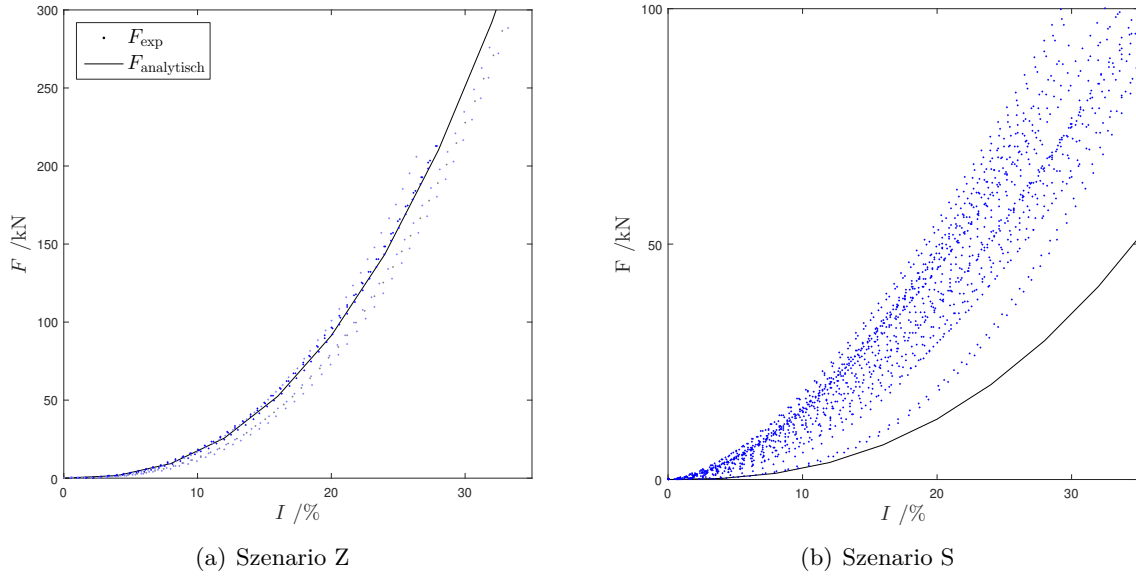


Abb. 5.2.: Prognose $F(I)$ des analytischen Modells gegenüber den experimentellen Verfestigungskurven für quasistatische Belastungen.

Durch *Fitting* an die experimentellen Daten von Szenario Z mit $I < 10^{-2}$ wird der in Gl. (5.10) dargestellte Parametersatz \mathfrak{P}_s für den statischen Lastfall ermittelt. Hierbei ist festzustellen, dass die initiale Fließgrenze $\sigma_0 = A$ analog Tab. 2.3 einen vernachlässigbar geringen Wert annimmt. Die verbleibenden beiden Parameter des Verfestigungsgesetzes B und n_0 nehmen im Vergleich mit Tab. 2.3 einen signifikant geringeren Wert ein.

$$\mathfrak{P}_s = \begin{cases} A = 0,01 \\ B = 4,12 \\ n_0 = 1,12 \end{cases} \quad (5.10)$$

Abb. 5.2 (a) stellt das parametrisierte analytische Modell den experimentellen Daten aus Szenario Z gegenüber.

Unter der Annahme, dass sich in Szenario S in einer Schnittdarstellung ein identisches Deformationsbild $w_{hh}(t, r)$ an der Oberseite ergibt, kann Gl. (5.8) durch Substitution der äußersten Integration $\int_0^H \dots dh$ durch $\int_0^{2\pi} \dots \phi d\phi$ umformuliert werden zu

$$F(t) \cdot d(t) = \int_0^{2\pi} \int_0^L \int_0^{R_\alpha} \sigma(\varepsilon(t, r), \dot{\varepsilon}(t, r)) \cdot \varepsilon \cdot \varphi \, dr dl d\varphi. \quad (5.11)$$

Dessen Auswertung ist in Abb. 5.2 (b) abgebildet.

Während das Modell mit dem gefundenen Parametersatz \mathfrak{P}_s das Szenario Z gut wiedergibt, werden die Ergebnisse aus Szenario S zu gering prognostiziert. Einen wesentlichen Unterschied zwischen beiden Szenarien stellt die Dimensionalität des Verformungszustands dar. In Szenario Z liegt ein quasi zweidimensionaler Zustand vor, wohingegen dieser sich in Szenario S dreidimensional gestaltet. Abb. 5.3 illustriert das Verhalten qualitativ. Dies lässt den Rückschluss zu, dass insbesondere die Vereinfachung bezüglich der

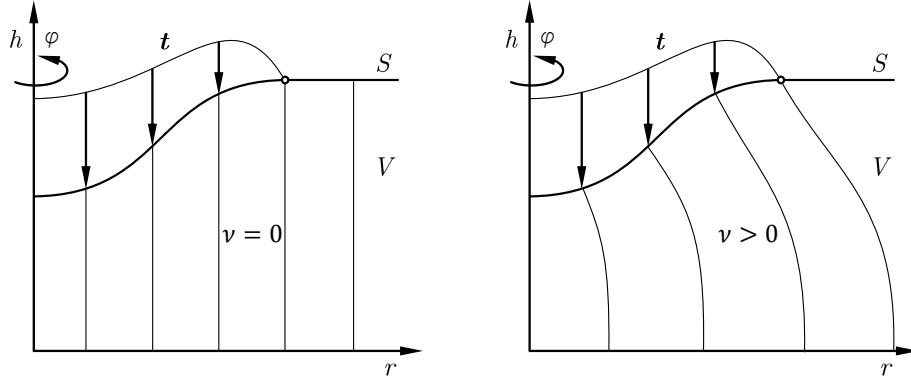


Abb. 5.3.: Qualitative Gegenüberstellung des Kontinuumsverhaltens bei idealer gegenüber nicht-idealer Kompressibilität im Modellbeispiel.

idealen Kompressibilität und der Querkontraktionszahl $\nu = 0$ das Modell der Realität zu weit entrückt. Eine entsprechende Berücksichtigung erfolgt in der FE-Modellentwicklung in Abschnitt 5.2.

5.1.3. Phänomenologische Ableitung des viskoplastischen Verfestigungsgesetzes

Um die in Abb. 4.8 beobachtete Krümmungsänderung der Verfestigungskurven über die Intrusionsrate abbilden zu können, ist ein Verfestigungsgesetz mit einem analogen Verhalten über die Dehnrate $\dot{\epsilon}$ erforderlich. Zur Abbildung des Phänomens muss der Exponent $n(\dot{\epsilon}_p)$ der gewählten Ludwik-Verfestigung abhängig von der plastischen Dehnrate formuliert werden und dabei die folgenden Bedingungen erfüllen:

$$n(\dot{\epsilon}_p) \begin{cases} = n_0 > 1 & \text{für } \dot{\epsilon}_p = \dot{\epsilon}_0 \approx 0 \\ = 1 & \text{für } \dot{\epsilon}_p = \dot{\epsilon}_{lin} \\ < 1 & \text{für } \dot{\epsilon}_p > \dot{\epsilon}_{lin} \\ > 0 & \text{für } \dot{\epsilon}_p \rightarrow \infty \end{cases} \quad (5.12)$$

n_0 stellt dabei den quasistatischen Verfestigungsexponenten analog Abschnitt 5.1.2 dar. Eine zu bestimmende Dehnrate $\dot{\epsilon}_{lin}$ resultiert in einer linearen Verfestigungskurve, wie im mittleren Geschwindigkeitsbereich in Kapitel 4 beobachtet. Zur Erlangung des gewünschten degressiven Verhaltens gilt $n(\dot{\epsilon}_p) < 1 \forall \dot{\epsilon}_p > \dot{\epsilon}_{lin}$.

Die Bedingung $n(\dot{\epsilon}_p) > 0$ im Betrachtungsgebiet ist notwendig, da andernfalls bei stetigen Verlauf von $n(\dot{\epsilon}_p)$ beim Übergang $n(\dot{\epsilon}_p) \leq 0$ eine unphysikalische, unendlich große Fließbedingung entsteht.

Das hierin vorgeschlagene Verfestigungsgesetz, das diesen Anforderungen gerecht wird, hat die Form

$$\sigma_y(\epsilon_p, \dot{\epsilon}_p) = A + B \cdot \left(\frac{\epsilon_p}{\epsilon_{SP}} \right)^{n(\dot{\epsilon}_p)} \quad (5.13)$$

mit

5. Phänomenologisch basierte Modellierung des dynamischen Deformationsverhaltens

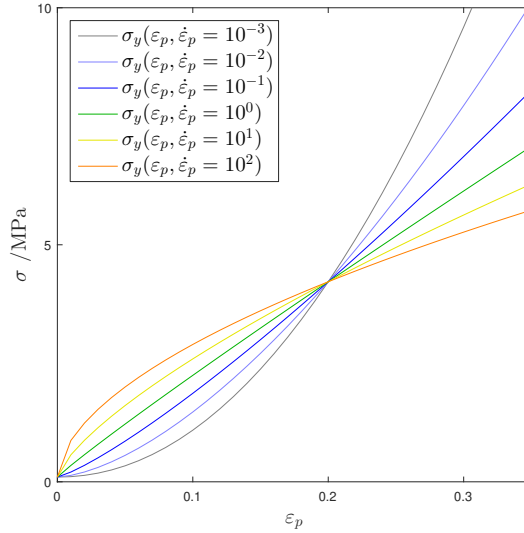


Abb. 5.4.: Phänomenologisch basiertes Verfestigungsgesetz, exemplarisch parametrisiert mit \mathfrak{P}_s , $C = 3$ und $\varepsilon_{SP} = 0, 2$.

$$n(\dot{\varepsilon}_p) = n_0 \cdot e^{-\ln(n_0) \cdot \left(\frac{\log \dot{\varepsilon}_p - \log \dot{\varepsilon}_0}{C} \right)} \quad (5.14)$$

ε_{SP} ist die Dehnung des Schnittpunkts an dem $\sigma_y(\varepsilon_{SP}, \dot{\varepsilon}_p) = A + B \forall \dot{\varepsilon}_p$ einen identischen Wert annimmt. Der dehnratenabhängige Exponent besteht aus den Materialparametern n_0 und $\dot{\varepsilon}_0$ für $\dot{\varepsilon}_p \rightarrow 0$. C symbolisiert die Anzahl der Größenordnungen von $\dot{\varepsilon}_p$ zwischen $\dot{\varepsilon}_0$ bis zum Auftreten einer linearen Verfestigung mit $n(\dot{\varepsilon}_p) = 1$:

$$C = \log(\dot{\varepsilon}_p(n = 1)) - \log(\dot{\varepsilon}_0) \quad (5.15)$$

Abb. 5.4 zeigt das Verfestigungsgesetz exemplarisch mit dem statischen Parametersatz \mathfrak{P}_s , $C = 3$ und $\varepsilon_{SP} = 0, 2$.

5.2. Problemformulierung mittels der Finite-Elemente-Methode

Der folgende Abschnitt befasst sich zunächst mit der Modellierung der Versuchsszenarien mittels der FEM. Mit dem Ziel der automobilen Anwendung in der Crash-Auslegung gehen eine Reihe von Voraussetzungen einher. Durch den hohen Grad an Nichtlinearitäten, die mit der Umformung des Fahrzeugs einhergehen und die ein Crash gewöhnlicherweise mit sich bringt, findet die Auslegung mit expliziten FE-Methoden statt. Hierdurch ist es möglich wechselnde Kontaktbedingungen, Versagen von Material und Verbindungstechnik ohne die Vielzahl an Equilibriumsiterationen der impliziten FEM abzubilden.

Als zentraler Parameter für die Simulation ist das explizite Zeitinkrement δt anzusehen, das üblicherweise in der Größenordnung $10^{-7} \text{ s} \geq \delta t \geq 10^{-6} \text{ s}$ gewählt wird. Zur Wahrung der Stabilität ergibt sich daraus eine in der Craschauslegung übliche minimale Kantenlänge der Elemente von etwa 5 mm für Aluminium [90]. Da dies dem Material des Zellgehäuses entspricht und das Zellinnere etwa die gleiche Dichte aufweist, wird dieser Richtwert für die Diskretisierung des Modells herangezogen.

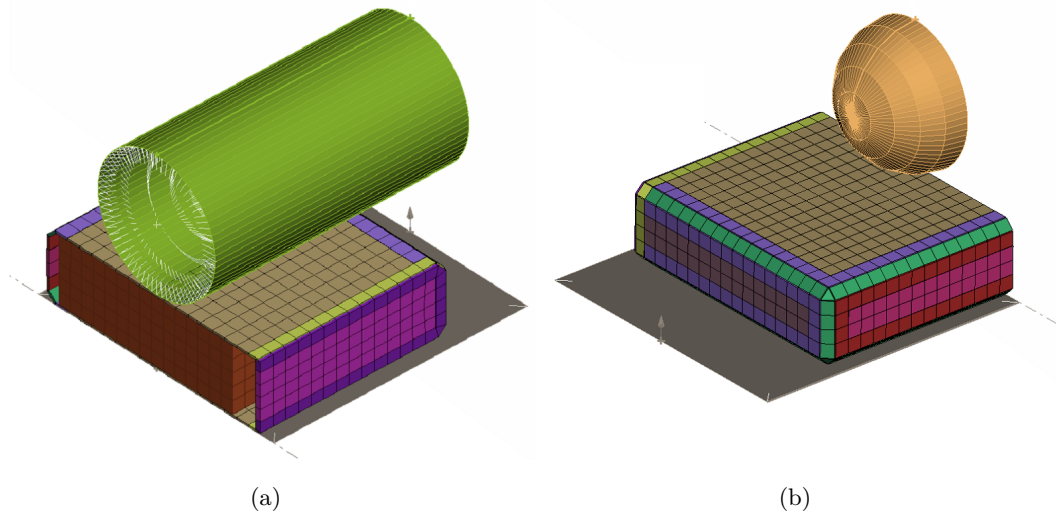


Abb. 5.5.: FEM-Modelle der Szenarien Z und S.

Als *Solver* dient die Software Abaqus FEA in der Version 2016.

5.2.1. Finite-Elemente-Modelle der Experimente

Abb. 5.5 zeigt das Netz des Zellmodells sowie die zugrundegelegten Randbedingungen. Die Symmetrie der Komponente wird zur Steigerung der Effizienz genutzt.

Sowohl die Auflagefläche als auch die Intrusionsgeometrien sind als Starrkörper mittels analytischer Oberflächen modelliert. Da beide Geometrien in ihrer realen Ausfertigung aus gehärtetem Stahl gefertigt sind, wird aufgrund der signifikant höheren Festigkeit davon ausgegangen, dass dies eine zulässige Vereinfachung darstellt. Für das Widerlager sind die translatorischen und rotatorischen Verschiebungen in alle Raumrichtungen gesperrt. Die Randbedingungen der Intrusionsgeometrien sind bis auf die Deformationsrichtung, die mit einer konstanten Geschwindigkeit v_{sim} versehen ist, konstant gleich Null.

Das Zellgehäuse besteht aus Schalenelementen erster Ordnung (S4R und S3R), wohingegen das Zellinnere aus Kontinuums-elementen erster Ordnung (C3D8R und C3D6R) aufgebaut ist. An der Färbung der Schalenelemente ist zudem die Abbildung einer Wärmeeinflusszone aufgrund der Siegelnaht ersichtlich. Für das Gehäuse wird das entsprechende, validierte Materialmodell aus der unternehmensinternen Datenbank inklusive der Spezifikationen deren geschweißten Zustands entnommen. Die Batteriepole werden nicht abgebildet. Das Materialmodell des Zellinneren wird im nachfolgenden Abschnitt 5.2.2 diskutiert.

Zwischen allen abgebildeten Komponenten ist ein generischer Kontakt (*CONTACT INCLUSION, ALL EXTERIOR) mit einem Reibwert $\mu = 0,2$ definiert.

Die simulierte Gesamtzeit t_{ges} ermittelt sich durch Division der zu erreichenden Deformation $d(t_{ges}) = 10\text{ mm}$ durch v_{sim} . Hieraus ergibt sich eine unterschiedliche Anzahl an Inkrementen zur Erreichung des Simulationsendes, die aufgrund des Charakters des expliziten Lösungsverfahrens zu einem unerwünschten Fehler führt. Um dieses Problem zu vermeiden, wird $\delta t = t_{ges}/10^4\text{ s}$ gewählt und die variable Massenskalierung aktiviert. Die nachträgliche Überprüfung der im System vorhandenen Energien ergibt, dass die ex-

5. Phänomenologisch basierte Modellierung des dynamischen Deformationsverhaltens

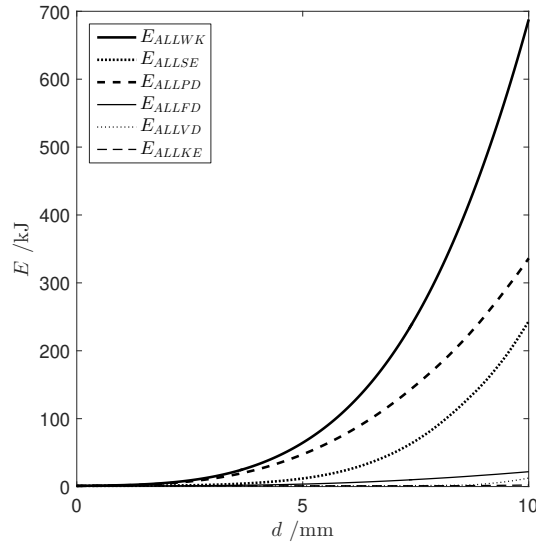


Abb. 5.6.: Darstellung der im FE-Modell vorhandenen Energien $\neq 0$ über der Deformation bis $d(t_{ges}) = 10mm$ mit $I = 10^2 s^{-1}$.

terne, dem System zugeführte Arbeit näherungsweise gänzlich elastisch gespeichert oder plastisch dissipiert wird. Durch die Massenskalierung tritt folglich kein signifikanter Fehler in Form einer überproportionalen Zunahme der kinetischen Energien auf. Dadurch ist es zulässig, das Modell innerhalb von 10^4 Inkrementen unabhängig von v_{sim} zu lösen und Fehler aufgrund unterschiedlicher Inkrementierung werden vermieden.

$$\frac{E_{ALLKE} + E_{ALLFD} + E_{ALLAE}}{E_{ALLSE} + E_{ALLPD}} \rightarrow 0 \Rightarrow E_{ALLWK} \approx E_{ALLSE} + E_{ALLPD} \quad (5.16)$$

mit

E_{ALLKE}	kinetische Energien
E_{ALLFD}	über Reibung dissipierte Energien
E_{ALLAE}	Energien durch stabilisierende Eingriffe des Solvers
E_{ALLSE}	elastisch gespeicherte Energien
E_{ALLPD}	plastisch dissipierte Energien
E_{ALLWK}	Arbeit extern wirkender Kräfte

5.2.2. Hypothese zum Materialmodell

Die meisten Ansätze zur Modellierung des Materialverhaltens in Abschnitt 2.6 basieren auf dem *Crushable Foam* Modell MAT63 der Software LS Dyna. Wie in Abschnitt 2.4 dargelegt, verfügt dieses über eine Fließfläche nach von Mises in Kombination mit einer Fließregel idealer Kompressibilität.

Nachdem das Modell für den quasistatischen Belastungsfall multipel validiert wurde, siehe Tab. 2.3, wird eine identische Fließfläche $f = q - \sigma_y$ übernommen.

5.2. Problemformulierung mittels der Finite-Elemente-Methode

Bezüglich der idealen Kompressibilität zeigen einerseits die Ergebnisse innerhalb Abschnitt 4.4.3 und die theoretische Betrachtung in Abschnitt 5.1, dass diese Annahme eine begrenzte Validität für die untersuchten prismatischen Zellen besitzt. Bemessen an der Entwicklung der Versagensintrusion I_c über die Intrusionsrate I stellen hohe Deformationsgeschwindigkeiten das kritische Belastungszenario dar. Unter diesen Konditionen zeigen die Ergebnisse in Abschnitt 4.4.3 ein näherungsweise inkompressibles Materialverhalten, weshalb die plastische Querkontraktionszahl zu $\nu_p = 0,5$ festgelegt wird. Es ergibt sich ein plastisches Potential $g = q$.

Da gemäß Abschnitt 5.1 eine geringe initiale Fließspannung σ_0 zu erwarten ist, die zu sofortigem Plastifizieren führt, werden die elastischen Parameter etwa den Werten in Tab. 2.3 folgend zu $E = 1 \text{ GPa}$ und $\nu_e = \nu_p = 0,5$ gewählt.

Das sich ergebende Materialmodell wird mit dem parametrisierten Verfestigungsgesetz $\sigma_y(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p)$ gemäß Abschnitt 5.1.3 versehen.

5.2.3. Parametrisierung

Zur Parametrisierung des Materialmodells dient ein DoE, mit dem eine Antwortfläche f in Form eines KNN erzeugt wird. Diese wird im letzten Schritt mit den Versuchsdaten abgeglichen, um den gewünschten Parametersatz für dynamische Anwendungen \mathfrak{P}_d zu erhalten.

Jeder Parametersatz \mathfrak{P}_i des DoE umfasst die Parameter des Materialmodells A, B, ε_{SP} und C gemäß Gl. (5.13) sowie $\dot{I} = v_{sim}/D_v$ (vgl. Gl. (4.1)) im Intervall von $10^{-2} \text{ s}^{-1} \leq \dot{I} \leq 10^2 \text{ s}^{-1}$ entsprechend den experimentell untersuchten Intrusionsraten.

Der verwendete Antwortflächentyp des KNN erzeugt eine *Blackbox*-Funktion für f , die auf beliebige funktionale Zusammenhänge trainiert werden kann. Gegenüber anderen Approximationsmethoden besitzt dies den Vorteil, dass bei ausreichend großem Trainingsdatensatz ein *a priori* unbekannter Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen prognostiziert werden kann. Algebraische Antwortflächen, wie beispielsweise Polynome, sind in vielen Fällen zweckmäßig, sind jedoch in ihrer Prognosegüte durch die Ähnlichkeit der zugrundeliegenden Funktion mit dem tatsächlichen Zusammenhang limitiert.

Zur Sicherstellung eines ausreichend großen Trainingsdatensatzes für das KNN werden $N = 5 \cdot 10^3$ Faktorkombinationen der Parameter mittels aLHS erzeugt. Diese werden anschließend für beide Szenarien simuliert und anhand der F - I -Kurven jeweils zwei unabhängige, einschichtige *feedforward*-KNN mit sukzessive zunehmender Neuronenzahl mittels der Hebb'schen Lernregel trainiert bis ein Bestimmtheitsmaß von mehr als $R^2 > 99,9\%$ erreicht ist. Abb. 5.7 zeigt die Prognosegüte der Antwortflächen mit 80 Neuronen, indem die prognostizierte Deformationskraft $F_{KNN}(\mathfrak{P}_i, I_i)$ über der per Simulation ermittelten Deformationskraft $F_{sim}(\mathfrak{P}_i, I_i)$ bei identischem Parametersatz \mathfrak{P}_i und identischer Intrusion I_i aufgetragen ist. Ergibt sich

$$\frac{F_{KNN}(\mathfrak{P}_i, I_i)}{F_{sim}(\mathfrak{P}_i, I_i)} = 1 \quad (5.17)$$

liegt eine exakte Prognose vor und der das Datentupel symbolisierende Punkt liegt auf der Diagonale der Darstellung. Je weiter dieser davon entfernt ist, desto größer ist der Prognosefehler. Zusätzlich zur visuellen Auswertung zeigt das Bestimmtheitsmaß von jeweils $R^2 > 99,9\%$, dass die Antwortflächen die Simulationsergebnisse adäquat repräsentieren.

5. Phänomenologisch basierte Modellierung des dynamischen Deformationsverhaltens

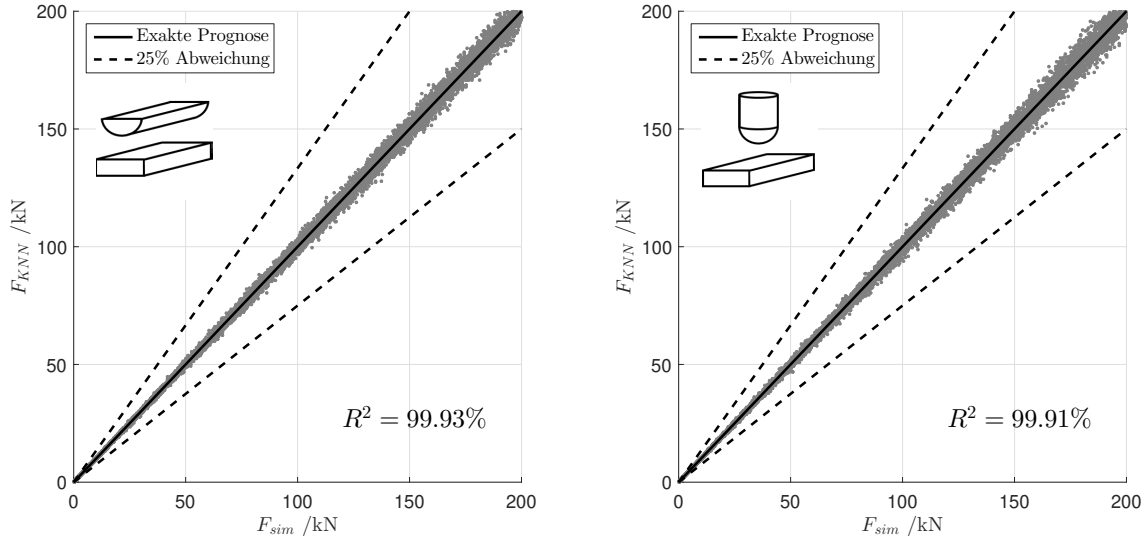


Abb. 5.7.: *True-Predicted*-Diagramm der Antwortfläche gegenüber den Simulationsdaten.

Abschließend werden beide KNN in inverser Weise ausgewertet und bei gleicher Gewichtung mit den Versuchsergebnissen *gefitet*, sodass sich der optimale, dynamische Parametersatz \mathfrak{P}_d ergibt:

$$\mathfrak{P}_d = \begin{cases} A = 0.010 \\ B = 24.89 \\ \varepsilon_{SP} = 0.209 \\ n_0 = 5.148 \\ C = 3.185 \end{cases} \quad (5.18)$$

Verglichen mit dem Stand der Technik bestätigt sich die sehr geringe initiale Fließgrenze $\sigma_0 = A$. Um den Faktor B mit den in Tab. 2.3 aufgeführten, quasistatischen Werten zu vergleichen, ist

$$\sigma_y(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p = 0) = A + B \cdot \frac{\varepsilon_p^{n_0}}{(\varepsilon_{SP})^{n_0}} = A + 3161 \cdot \varepsilon_p^{n_0} \quad (5.19)$$

auszuwerten. Sowohl der sich ergebende Faktor als auch n_0 ist signifikant höher als die im Stand der Technik ermittelten Werte.

5.2.4. Validierung des parametrisierten Materialmodells

Abb. 5.8 zeigt das *True-Predicted*-Diagramm für die F_{sim} - F_{exp} -Tupel, woran die Prognosegüte des Materialmodells mit dem parametrisierten Verfestigungsgesetz $\sigma(\mathfrak{P}_d)$ ersichtlich ist. Verläufe unterhalb der Diagonale bedeuten eine Unterprognose des Verfestigungsverhaltens und umgekehrt. Das Bestimmtheitsmaß ergibt sich zu $R^2 > 80\%$.

In Abb. 5.9 wird zur Beurteilung des Deformationsverhaltens ein Schnitt durch das FE-Modell über eine Hochgeschwindigkeitsaufnahme in Szenario Z gelegt. Beide Aufnahmen entstammen einer identischen Intrusionsrate und einer Intrusion von 40 %. Wie ersichtlich

5.3. Definition eines Versagenskriteriums

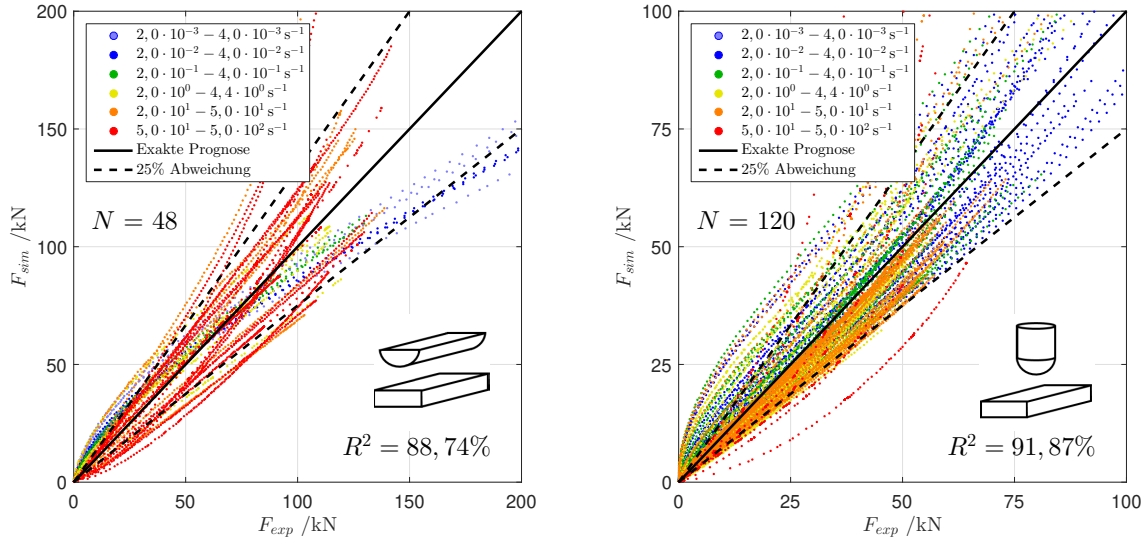


Abb. 5.8.: True-Predicted-Diagramm der Simulationsdaten gegenüber den Experimentaldaten.

ist, besitzen die Silhouetten Ähnlichkeit, sodass davon ausgegangen werden kann, dass über die Annahme der Inkompressibilität eine gute Approximation der makroskopischen Verformung erreicht wird.

Nachdem sowohl das globale Deformationsverhalten als auch das Verfestigungsverhalten mit dem parametrisierten Materialmodell in akzeptabler Güte abgebildet werden, eignet sich dieses als adäquate Repräsentation des Realverhaltens für die virtuelle Auslegung.

5.3. Definition eines Versagenskriteriums

Durch die makroskopische Beobachtung des Versuchs liegen keine detaillierten Information über die genaue Lokalisierung des kritisch beschädigten Bereichs innerhalb der Zelle vor. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass dieser sich im Bereich der größten Verformung befindet.

In Abb. 5.9 ist neben der Kontur der Zelle auch die Verteilung der plastischen Dehnungen lateral zur Wickelstruktur $\varepsilon_{p,\perp}$ dargestellt. Es ergibt sich im höchstverformten Bereich eine näherungsweise homogene Dehnungsverteilung über die Zelldicke mit $\delta\varepsilon_{p,\perp} \approx 5\%$. Unter Berücksichtigung dieses Fehlers gilt

$$\varepsilon_{p,\perp} \approx I \quad (5.20)$$

$$\dot{\varepsilon}_{p,\perp} \approx \dot{I} \quad (5.21)$$

und somit ist ein direkter Vergleich mit den Versuchsergebnissen möglich und erlaubt die Beurteilung einer kritischen Beschädigung. Dieser Wert gilt mit $I = 40\% \approx 2 * I_{0,S}$ für alle analysierten Prüflinge gemäß Tab. 4.5, sodass der tatsächliche Fehler der Abschätzung etwa auf die Hälfte zu beziffern ist. Zur Beurteilung kritischer Deformationen wird also

5. Phänomenologisch basierte Modellierung des dynamischen Deformationsverhaltens

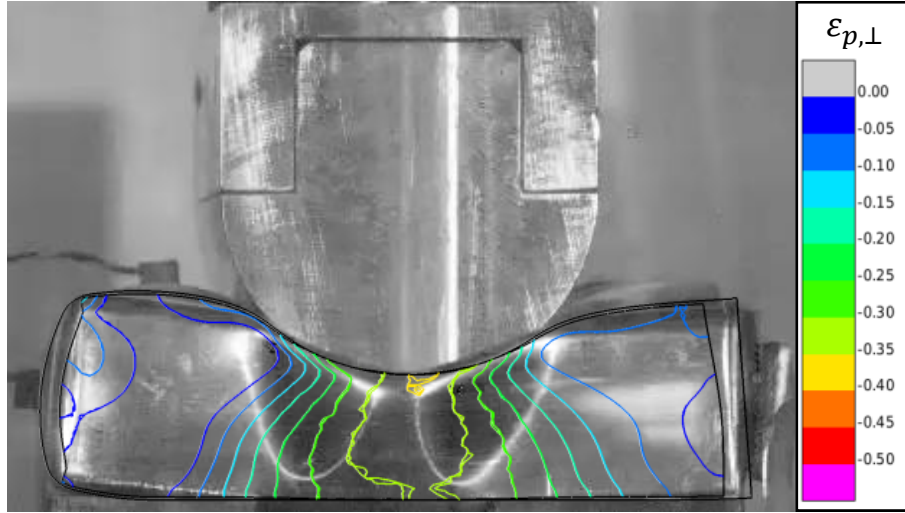


Abb. 5.9.: Vergleich des makroskopischen Verformungsbildes bei $I = 40\%$ und $\dot{I} \approx 4 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$.

die zum Lagenaufbau laterale Dehnung ϵ_{\perp} gegenüber der Dehnrates ausgewertet und in Relation zu den statistischen Maßzahlen der Versagensparameter im Versuch gesetzt.

Abb. 5.10 zeigt idealisiert, wie sich der kritische Deformationszustand eines Elements bzw. einer Zelle ermittelt. Vor einer Beaufschlagung liegt ein undeformierter Zustand $\epsilon_{p,\perp} = \dot{\epsilon}_{p,\perp} = 0$ vor. Im Falle eines Kontakts mit der sich deformierenden Umgebung oder Deformation benachbarter Elemente koppeln sich die Knoten des betrachteten Elements kinematisch an diese an, wodurch sich dessen (plastische) Dehnrates in kurzer Zeit stark erhöht. Fortan wird Energie durch Plastifizierung dissipiert. Hierdurch sinkt einerseits die Dehnrates, andererseits steigt die Dehnung bis zur maximalen Deformation an. Zu diesem Zeitpunkt wird dem Element entweder keine weitere externe Arbeit zugeführt oder die gesamte Energie des Systems ist abgebaut.

Während dieses Deformationsvorgangs existiert ein Punkt minimaler statistischer Sicherheit gegenüber der beispielsweise experimentell ermittelten, kritischen Intrusion. Über deren statistische Verteilung wird die Wahrscheinlichkeit für das Eingehen eines kritischen Zustands ermittelt. Dieser sich im gewählten Beispiel zur $i = 3$ - bis $i = 6$ -fachen Standardabweichung ergebende Wert ist anschließend gegen eine Risikoakzeptanzgrenze zu evaluieren.

5.3. Definition eines Versagenskriteriums

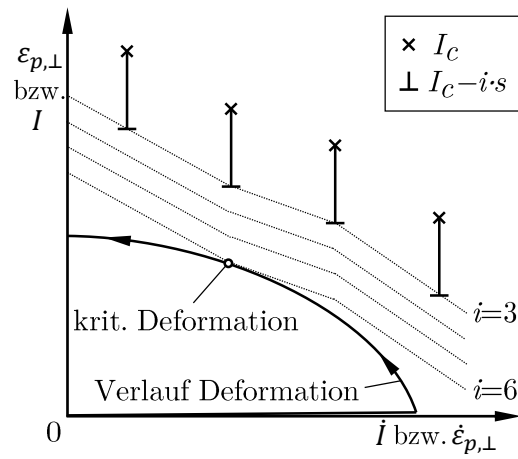


Abb. 5.10.: Schematische Darstellung des Deformationsverlaufs eines Elements und des kritischen Deformationszustands.

5.4. Kernbotschaften zum Modellierungsansatz

- I. Für Szenario U wird im Rahmen der Arbeit kein Materialmodell entwickelt, da kinematische Betrachtungen der Identifikation einer als unzulässig definierten Belastung genügen.
- II. Durch eine analytische Problemformulierung des quasistatischen Lastfalls anhand des Prinzips der virtuellen Arbeit liegt ein theoretisches Grundverständnis für die Szenarien S und Z vor.
- III. Die F - I -Kurven beider Szenarien ergeben bei identischer Materialparametrierung eine signifikante Diskrepanz. Dies ist auf die vereinfachende Annahme idealer Kompressibilität zurückzuführen.
- IV. Anhand der F - I -Kurven in Relation zum gewählten Verfestigungsgesetz nach Ludwik wird abgeleitet, dass der inhärente konstante Exponent nicht in der Lage ist, das experimentell beobachtete Verfestigungsverhalten zu modellieren.
- V. Eine Hypothese für ein Verfestigungsgesetz mit dehnratenabhängigem Exponenten wird formuliert, um die experimentellen Daten nachzubilden.
- VI. Aus dem Stand der Technik und den experimentellen Erkenntnissen werden das Von-Mises-Fließkriterium $f(\sigma_y) = \sigma_0 - q$ und ein plastisches Potential $g = q$ abgeleitet, das inkompressible Materialverhalten entspricht.
- VII. Mittels FEM wird der dynamische Lastfall beider Szenarien modelliert und mit dem parametrisierten Materialmodell versehen.
- VIII. Die Parametrisierung erfolgt anhand eines DoE mittels aLHS und erzeugt eine Antwortfläche in Form eines KNN, die für beide Szenarien eine Güte $R^2 > 99,9\%$ der Prognose $F_{KNN}(I) \mapsto F_{sim}(I)$ besitzt. Das *Fitting* der Antwortfläche auf die experimentellen Daten ergibt das parametrisierte Materialmodell. Verglichen zu Abschnitt 2.4 unterscheiden sich die Materialparameter.
- IX. Validierungssimulationen der Experimente ergeben eine Prognosegüte $F(I)_{sim} \mapsto F_{exp}$ zu $R^2 > 0,8$ und für $\dot{I} > 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ ein identisches makroskopisches Deformationsbild. Das Modell wird folglich als valide eingestuft.
- X. Für die Identifikation eines kritischen Deformationszustands wird ein probabilistischer Vergleich der plastischen Dehnung $\varepsilon_{p,\perp}$ und Dehnrate $\dot{\varepsilon}_{p,\perp}$ lateral zum Wickelaufbau mit den experimentellen Ergebnissen der Intrusion I und Intrusionsrate \dot{I} unter Inkaufnahme eines geringen Fehlers vorgeschlagen.

6. Anwendung des Modells in einer Gesamtfahrzeugsimulation

Zur Bestätigung der Anwendbarkeit sowie Quantifizierung des gravimetrischen und volumetrischen Potenzials wird die Abbildungsmethode der Zellen gemäß Kapitel 5 in das Crashmodell eines Gesamtfahrzeugs implementiert. Der zur Bewertung dienende NCAP-Pfahlerash mit 32 km h^{-1} ist im vorangegangenen Kapitel 1 und Abschnitt 4.1.2 beschrieben, siehe Abb. 1.1 (c) und Abb. 4.3. Dieser Lastfall besitzt für strukturintegrierte HVS-Konzepte besondere Relevanz, da die Komponente in signifikantem Teil zum Gesamtfahrzeugverhalten beiträgt. Gleichzeitig existiert hier das größte Potenzial, da gewonnener Bauraum über die gesamte Länge des Speichers mit Zellen genutzt werden kann und somit den bei gleichem Volumen enthaltenen Energieinhalt überproportional zum Mehrgewicht steigert. Für die Untersuchung wird exemplarisch eine Risikoakzeptanzschwelle von $R_s < 3s = 99,7\%$ gewählt. Dies stellt weder einen Auslegungsstandard noch ein gesellschaftlich akzeptiertes Risiko dar, sondern dient lediglich der Illustration der Bewertungsmethode.

Abb. 6.1 stellt die Adaption des Basiskonzepts in Form einer sukzessiven Verlagerung der Zellen in den Bereich eines Deformationsrisikos dar. Dies erfolgt durch die Verschiebung jeweils um eine halbe Zelldicke T , da mit diesem Maß in der Fahrzeugmitte bei einem symmetrischen Aufbau des HVS eine zusätzliche Zelle integrierbar ist. Ob dies bezüglich der elektrischen Verschaltung der Zellen und Module zueinander möglich ist, wird vernachlässigt.

Zur Erlangung der Information über den Deformationszustand der Zellen, werden die Werte für $\varepsilon_{p,\perp}$ und $\dot{\varepsilon}_{p,\perp}$ aller Elemente des Zellmaterials ausgegeben und ausgewertet. Dies ist zweckmäßig, erlaubt zunächst aber keine örtlich aufgelöste Detektion.

Die Risikoeinstufung erfolgt anhand der in Abb. 4.11 dargelegten Ergebnisse der Serienzelle L_S .

In Abb. 6.2 (a) ist zunächst das Ergebnis der Basiskonfiguration abgebildet, in der ausreichende Sicherheitsvorhalte zur Vermeidung einer Zellbeaufschlagung vorhanden sind. Die Elemente verhalten sich dabei erwartungsgemäß wie in Abschnitt 5.3 beschrieben ohne eine Deformationen zu erfahren und entsprechende Ausschläge von $\varepsilon_{p,\perp}$ und $\dot{\varepsilon}_{p,\perp}$. Unter Berücksichtigung der sehr geringen initialen Fließgrenze des Materialmodells bestätigt dies, dass es aufgrund des Impulses, der durch den Aufprall des Fahrzeugs mit dem Hindernis entsteht und der damit einhergehende negativen Beschleunigung, zu keiner fehlerhaften Verformung kommt.

Abb. 6.2 (b) zeigt eine Auswertung bei der eine deutliche Verformung vorliegt. In der Kurvenschar ist das in Abb. 5.10 skizzierte Verhalten erkennbar. Das Auswertungsergebnis liegt unterhalb R_s und somit stellt die Aufnahme von zwei weiteren Zellen ein zulässiges Potenzial dar. Demgegenüber weist die Integration einer dritten Zelle gemäß Abb. 6.2 (c) ein inakzeptables Risiko auf.

6. Anwendung des Modells in einer Gesamtfahrzeugsimulation

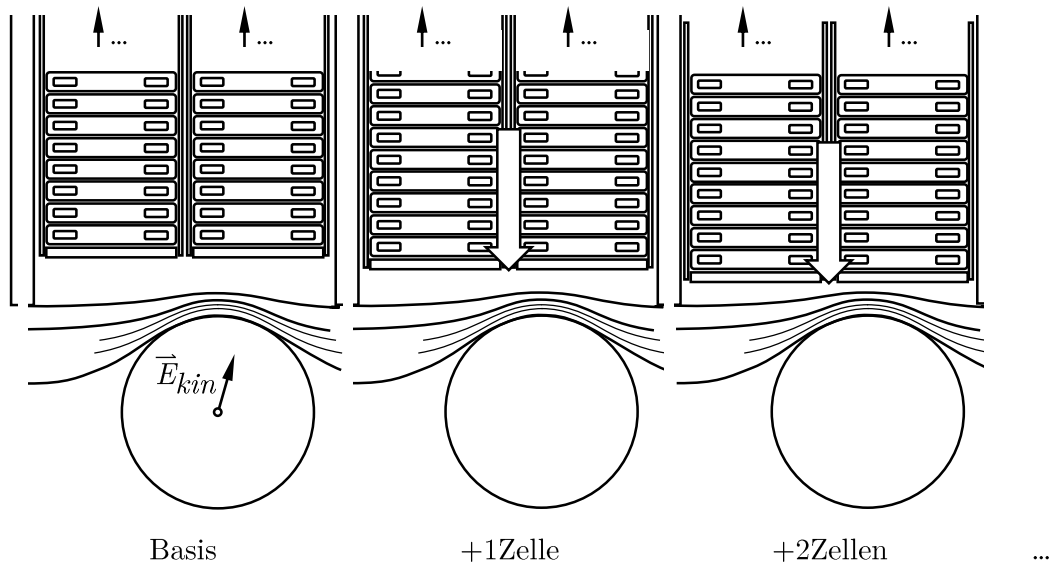
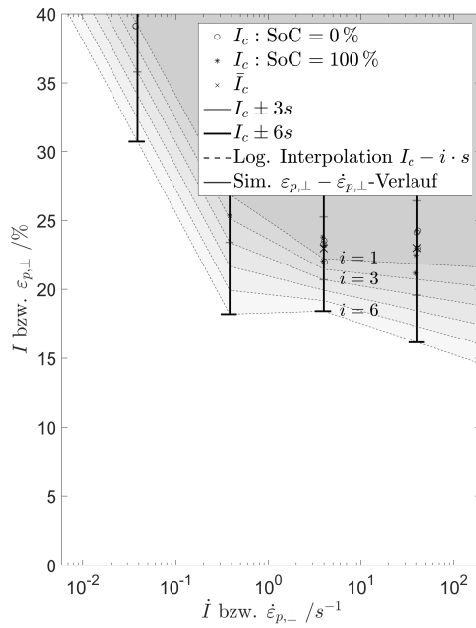


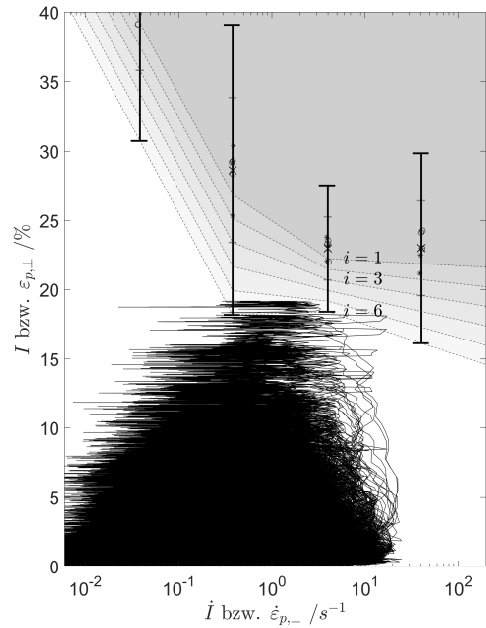
Abb. 6.1.: Darstellung der Konzeptadaption zur Steigerung des gravimetrischen und volumetrischen Energieinhalts.

Das in Abschnitt 1.1 beschriebene Problem der Modellpflege wird in Abb. 6.2 (b) adressiert. Obwohl die prototypischen Zellen H_p äquivalente Abmessungen besitzen und damit geometrisch in den Speicher integrierbar sind, erfüllt das Gesamtkonzept die Sicherheitsanforderungen nicht mehr. Sollte im Rahmen eines *Facelifts* die Aufnahme von Zellen höherer Kapazität geplant sein, ist ein entsprechender Sicherheitsvorhalt zu treffen.

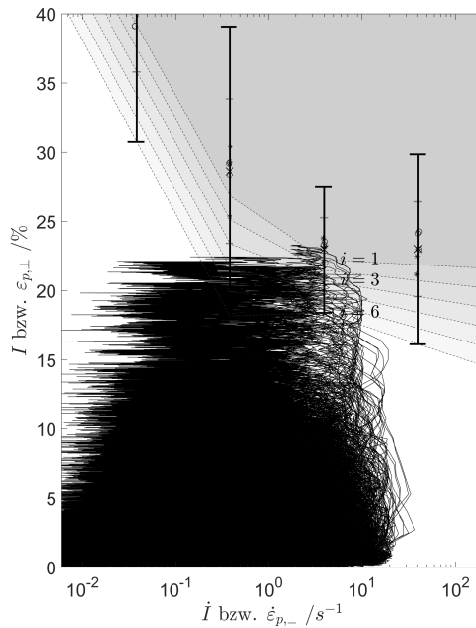
Zusammenfassend ist das gravimetrische Potenzial auf ein bis zwei Zellen über die Fahrzeugbreite zu beziffern. Dies basiert auf einer Sicherheit, bei der davon auszugehen ist, dass bei 3 von 1000 Fällen eine Beschädigung mit möglichem thermischen Ereignis erfolgt. Für die Auslegung von Automobilen bedarf dies einer kritischen Auseinandersetzung.



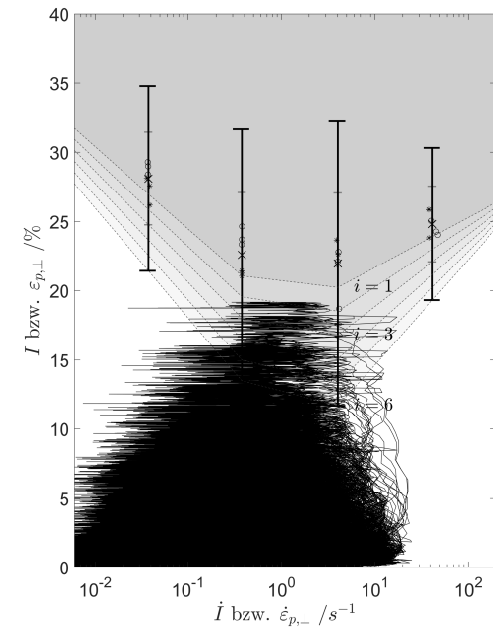
(a) Basis mit L_S



(b) +2 Zellen L_S



(c) +3 Zellen L_S



(d) +2 Zellen H_p

Abb. 6.2.: Auswertung der auftretenden $\varepsilon_{p,\perp} - \dot{\varepsilon}_{p,\perp}$ -Verläufe analog zu 5.10 aus den Gesamtfahrzeugrechnungen mit in den Deformationsbereich verschobenen Zellmodulen.

7. Zusammenfassung

Den Kern der Arbeit stellt ein extensives Versuchsprogramm zur Analyse des Deformationsverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen und die phänomenologisch basierte Ableitung eines Simulationsmodells für die virtuelle Auslegung von Fahrzeugcrashs dar. Dieses dient der Beantwortung der Fragestellung nach dem volumetrischen und gravimetrischen Potenzial in der Dimensionierung von HVS bei Zulassen einer Zellbeaufschlagung.

Der Stand der Technik zeigt eine signifikante Lücke bezüglich des im automobilen Bereich verbreiteten prismatischen Zellformats. Zudem beschränken sich bisherige experimentelle Studien größtenteils auf quasistatische Deformationsuntersuchungen und entladene Zellen. Beides Randbedingungen, die im Falle des Crashes eines in der Regel teilweise geladenen Elektrofahrzeugs beschränkte Gültigkeit besitzen. Gesamthaft wird festgestellt, dass - auch aufgrund der geringen Anzahl veröffentlichter Messungen - weitere, statistisch gesicherte Erkenntnisse benötigt werden.

Die vorliegende Arbeit adressiert diesen Bedarf mit einer extensiven Versuchsreihe. Der Versuchsplan umfasst 312 individuelle Experimente für drei quasistatische bis hochdynamische Belastungsszenarien mit zylindrischen und kugelförmigen Intrusionsgeometrien an entladenen und geladenen Zellen, wobei drei identische Wiederholungsmessungen je Faktorkombination vorgesehen sind. Um einen Rückschluss auf den Einfluss zeitlich parallel stattfindender Entwicklungsprozesse an Fahrzeug und Subkomponente zu identifizieren, dienen fünf aufeinanderfolgende Generationen zunehmender Fertigungsreife und spezifischen Energieinhalts als Untersuchungsgegenstand. Zur statistischen Beherrschung wird eine automatisierbare, objektive Methode vorgeschlagen anhand derer die mechanischen Charakteristika mittels vier Parametern in ausreichender Güte erfasst werden.

Zentrale Erkenntnis sind ausgeprägte Abhängigkeiten der rheologischen Eigenschaften von der zugrundeliegenden Deformationsgeschwindigkeit. Für das Verfestigungsverhalten wird erstmalig ein Übergang von progressivem zu degressivem Kraftaufwand für die Verformung beobachtet. Das als Versagenskondition genutzte Auftreten eines zellinternen Kurzschlusses tritt unter Intrusionenstiefen auf, die negativ logarithmisch zur Intrusionsrate korreliert sind. Hinsichtlich des makroskopischen Deformationsverhaltens erscheinen die Zellen unter quasistatischen Messungen kompressibel, für höhere Geschwindigkeiten jedoch inkompressibel. Keines dieser Charakteristika zeigt eine nennenswerte Abhängigkeit von der Zellgeneration sowie vom Ladegrad. Die beiden Belastungsszenarien lateral zur zellinternen Struktur führen zu vergleichbaren Ergebnissen. Eine parallele Belastung hingegen offenbart eine signifikante Fragilität der Zelle, die eine Belastungsvermeidung anhand der statistischen Verteilung potentiell zulässiger Intrusion nahelegt.

Anhand dieser Erkenntnis wird der Lastfall für die sich anschließende Modellentwicklung als zu risikobehaftet in Relation zum Potential für den automobilen Kontext ausgeschlossen.

Zu Beginn der Methodenentwicklung wird eine analytische Formulierung der beiden verbleibenden Lastfälle unternommen. Ein, dem Stand der Technik entsprechendes, Ver-

7. Zusammenfassung

festigungsgesetz nach Ludwik dient der Abbildung des quasistatischen Materialverhaltens. Mit der auf das Szenario zylindrischer Intrusionsgeometrie angepassten Parametrierung kann der zweite Lastfall nur mit erheblicher Abweichung prognostiziert werden. Als ursächlich hierfür wird die Vereinfachung einer idealen Kompressibilität für quasistatische Verformungen angenommen.

Anhand der experimentellen Erkenntnisse wird ein neuartiges Verfestigungsgesetz für dynamisches Verhalten und die Simulation mittels FEM abgeleitet. Das Modell nach Ludwik wird um den beobachteten Krümmungswechsel im Verfestigungsverhalten erweitern, indem der Exponent dehnratenabhängig definiert wird. Vom im Stand der Technik validierten Modell *crushable foam* wird das Fließkriterium nach von Mises adaptiert und - den experimentellen Erkenntnissen und analytischen Schlussfolgerungen entsprechend - mit einem plastischen Potential kombiniert, das inkompressible Materialverhalten entspricht.

Die Parametrisierung des Modells erfolgt anhand der parametrisierten Abbildung beider Lastfälle in FEM und einen DoE, das geeignet ist eine Antwortfläche in Form eines KNN mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 > 99,9\%$ zu erzeugen. Beim Abgleich des Metamodells mit den Versuchsdaten ergibt sich eine Parametrierung, mit der das Modell in der Lage ist, beide Szenario mit einer Prognosegüte $R^2 > 80\%$ wiederzugeben. Im visuellen Vergleich des makroskopischen Deformationsverhaltens anhand der deformierten Silhouette der Zelle ergibt sich ebenfalls eine akzeptable Repräsentation, weshalb das Modell als valide angesehen wird. Ergänzend zum Stand der Technik wird neben der Auswertung der plastischen Dehnung die Einbeziehung der plastischen Dehnrate als Bestandteil der Versagensbeurteilung definiert. Dies berücksichtigt die logarithmische Verringerung der Intrudierbarkeit über die Deformationsrate. Eine probabilistische Beurteilung auf Basis der experimentellen Daten wird als finaler Bestandteil des Modells für eine Abwägung gegenüber einer Risikoakzeptanzgrenze vorgeschlagen.

Die Simulation im Gesamtfahrzeug eines für die Auslegung von HVS zentralen Lastfalls bestätigt die Anwendbarkeit und Stabilität des Modells. Eine Auswertung nach der entwickelten Methodik ergibt ein geringes volumetrisches und gravimetrisches Potenzial einer Zellbeaufschlagung gegenüber dem damit einhergehenden Risiko.

7.1. Reflexion der angewandten Methodik

Zum Nachweis des Nutzens der vorgeschlagenen Methoden zur Extraktion und modellhaften Abbildung der mechanischen Eigenschaften von Lithium-Ionen-Batterien ist zu bewerten, ob die gemessenen Ergebnisse und abgeleiteten Erkenntnisse praxisrelevant, objektiv, nutzbar, allgemeingültig und zuverlässig sind, um in geeigneter Weise anspruchsvolle technische Fragen zu beantworten. Für das vorgeschlagene Vorgehen sind alle Punkte im Allgemeinen bejahend zu beurteilen.

Im Rahmen der experimentellen Studie werden die mitunter wichtigsten Einflussfaktoren für die Auslegung eingehend analysiert. Die für die mechanische Betriebsfestigkeit von Zellmodulen zentrale Eigenschaft der Alterungszustands der Zellen wurde jedoch nicht betrachtet. Da die Möglichkeit einer Veränderlichkeit der identifizierten Charakteristika in dessen Abhängigkeit existiert, verbleibt eine Auslegungsunschärfe.

Die Messwertermittlung und Auswertung erfolgt nach objektiven Kriterien und ein Bias wird durch redundante Messsysteme reduziert. Anhand der zweckmäßigen Reduktion zur

Komplexitätsbeherrschung des Informationsgehalts der Messwerte in Form von vier Parametern erfolgt zunächst eine nachgewiesene, objektive Verfälschung um bis zu 19 % bei den Verfestigungsparametern. Dieses wird jedoch durch Wiederholungsmessungen kompensiert, sodass hier grundsätzlich von validen Ergebnissen ausgegangen wird.

Das zur Identifikation eines kritischen Deformationszustand herangezogene Kriterium für einen signifikanten Spannungsfall besitzt eine zeitliche Komponente in Form der Trägheit des Spannungseinbruchs. Für langsame Geschwindigkeiten kann dies vernachlässigt werden, für die höchsten Geschwindigkeiten entsteht hierdurch ein reproduzierbarer Fehler, der die kritische Deformation zu hoch erscheinen lässt. Dies stellt eine plausible Erklärung für den zunächst unplausiblen Anstieg der entsprechenden Messwerte dar, der deren Gültigkeit einschränkt. Insgesamt lässt sich eine hohe Reproduzierbarkeit aller datenbasierten Ergebnisse feststellen.

Die visuelle, makrorheologische Beurteilung der Kompressibilität stellt eine zweckmäßige Methode dar, die in anderen Disziplinen einen validen Ansatz darstellt. Das Indiz einer geschwindigkeitsabhängigen Kompressibilität kann damit aufgezeigt, jedoch nicht gesichert bewiesen werden.

Die vollzogene Ableitung einer Fließregel inkompressiblem Verhaltens ist nicht uneingeschränkt haltbar. Im Rahmen einer qualitativen Beurteilung auf Gesamtfahrzeugebene, in der eine präzise Lokalisierung des Versagensortes innerhalb der Zelle nicht notwendig ist, wird der inhärente Fehler als gering eingeschätzt. Für quasistatische Belastungen ist davon auszugehen, dass das Modell das volumetrische Verhalten nicht korrekt abbildet.

Die Wahl einer Fließbedingung nach von Mises beruht auf im Stand der Technik validierten Ergebnissen. Bezüglich der Gültigkeit kann auf Basis der Versuchsergebnisse keine Aussage getroffen werden. Die Prognosegüte des Modells suggeriert *a posteriori* jedoch die Validität.

Eine Ermittlung des dehnratenabhängigen Verhaltens mittels konstanter Deformationsgeschwindigkeiten stellt eine etablierte Methode in den Werkstoffwissenschaften dar. Die Adaption dieses Verfahren auf die Untersuchung von Lithium-Ionen-Zellen erweist sich als zuverlässige Möglichkeit Phänomene direkt mit bestimmten Geschwindigkeiten in Relation zu setzen. Das phänomenologisch abgeleitete Verfestigungsgesetz erweist sich in der Simulation der untersuchten Lastfälle als prognosefähig, weshalb die Nutzbarkeit als gegeben anzusehen ist.

Die Beurteilung eines kritischen Deformationszustands beruht auf dem Abgleich der makroskopisch beobachteten, kritischen Intrusion und Intrusionsrate mit den lokalen Parametern plastischer Dehnung und Dehnrate im Simulationsmodell. Im Rahmen der für Crashsimulationen üblichen Diskretisierung ergibt dies den Vergleich von einem Element im Versuch vermessenen Element zu sechs virtuellen Elementen über die Zelldicke. Der dadurch vorherrschende Fehler der Intrusion wird zu einem absoluten Wert von 5 % beziffert, unter dessen Berücksichtigung der Ansatz als valide eingeschätzt wird.

7.2. Beantwortung der Forschungsfragen

Die Beantwortung der Forschungsfragen bedient sich der in Kapitel 3 unternommenen Aufteilung:

- I. Das im Stand der Technik identifizierte Verhalten anderer Li-Ionen-Zellen lässt sich

7. Zusammenfassung

in Teilen auf prismatische Zellen übertragen. Für das ermittelte Verfestigungsverhalten und kompressible Deformationsverhalten bei quasistatischen wird ein kongruentes Ergebnis ermittelt.

- II. Bei quasistatischen Deformationsgeschwindigkeiten ist ein identisches Materialverhalten unabhängig der zugrundeliegenden Zelle zu beobachten und für die Modellierung anwendbar.
- III. Die ermittelten Versuchsergebnisse zeigen eine signifikante Abhängigkeit vom Belastungsmodus bezogen auf den laminaren Aufbau. Für die eine lagenparallele Deformation wird eine signifikante Fragilität nachgewiesen.
- IV. Der Ladegrad der Zellen zeigt vernachlässigbaren Einfluss auf die mechanischen Charakteristika der untersuchten Zellen.
- V. Anhand der beobachteten Tendenz kann festgestellt werden, dass sich bereits frühe Prototypen näherungsweise identisch zum späteren Serienäquivalent verhalten. Das technische Heranreifen der Zellen äußert sich in der statistischen Stabilisierung des Messwerte, das in Form eines Robustheitsgewinns über die Entwicklung interpretiert werden kann.
- VI. Es wird vorgeschlagen die Ableitung eines Modells einerseits anhand deformationsratenkonstanter Kraftkurven über die Deformation und die Beobachtung der makrorheologischen Verhaltens zu unternehmen. Das im Rahmen der Arbeit anhand dieser Methode entwickelte Modell zeigt eine gute Repräsentation des Realverhaltens.
- VII. Das vorgeschlagene Modell prognostiziert die Kraftreaktion bei quasistatischen Deformationen korrekt. Anzunehmend prognostiziert es allerdings das volumetrische Verformungsbild nicht korrekt, sodass es keine validen Aussagen über das Mikroverhalten innerhalb der laminaren Struktur erlaubt.

7.3. Reflexion der Zielerreichung

Die im Rahmen der Arbeit durchgeführte experimentelle Studie analysiert das Deformationsverhalten prismatischer Zellen systematisch anhand relevanter Einflussfaktoren. Auf Grundlage einer hohen Versuchszahl werden die Einflüsse der geforderten, notwendigen Faktoren detailliert ausgewiesen. Die Erkenntnisse bilden die Grundlage zur phänomenologischen Ableitung des kontinuumsmechanischen Verhaltens, das in eine validierte Materialmodellierung für die FEM mündet.

Im Rahmen der Arbeit wird ein durchgängiger Prozess aufgezeigt, mithilfe dessen die Erzeugung eines validierten Materialmodells für die Anwendung in der Craschauslegung mittels FEM möglich ist. Damit wird die fundierte Quantifizierung des volumetrischen und gravimetrischen Potentials einer Zellbeaufschlagung in Abhängigkeit des einhergehenden Risikos ermöglicht, womit der zentrale Zweck des Vorgehens als erfüllt anzusehen ist.

Die bei der Studie des Stands der Technik aufgetretenen Forschungsfragen wurden belastbar beantwortet.

7.4. Ausblick

Zur Behebung vorliegender Unschärfen in der vorgeschlagenen Methodik sind zukünftige Arbeiten zur Analyse und Beschreibung des mikrorheologischen Verhaltens der laminaren Struktur und einer vermutlichen Festkörper-Flüssigkeits-Interaktion vonnöten. Hierüber ließe sich eine Hypothese zu einem hybriden Ansatz einer dehnratensensitiven Fließregel formulieren. Die Prognose eines Materialmodells basierend auf Kenntnis der laminaren Struktur bietet eine wertige Möglichkeit zur frühzeitigen Berücksichtigung in der Auslegung.

Ein vertieftes Verständnis für die abweichenden Phänomene der höchsten Geschwindigkeiten stellt einen weiteren Ansatz dar.

III. Abbildungsverzeichnis

1.1. Schematische Dissipationsanteile passiver Sicherheitskonzepte für elektrifizierte Fahrzeuge im Falle eines EuroNCAP Car-to-Pole-Crashes mit 32 km h^{-1} auf Tank oder B-Säule.	2
1.2. Visualisierte Struktur der Arbeit.	5
2.1. Zentrale Benchmark-Charakteristika bezüglich automobiler Anwendungen, beginnend von oben, im Uhrzeigersinn: Sicherheit, gravimetrische Energie- und Leistungsdichte, Alterungsverhalten, spezifische Kosten und Schnellladefähigkeit [1].	8
2.2. Vergleich kommerzieller Kathodenmaterialien, angelehnt an [1].	9
2.3. Laminare Struktur des physischen Aufbaus einer Lithium-Ionen-Zelle. . . .	10
2.4. Exemplarische OCV-Kurve zur Ermittlung und Einstellung des Ladegrads einer Li-Ionen-Zelle mit NMC-Chemie.	11
2.5. Handelsübliche Formate von Lithium-Ionen-Zellen, angelehnt an [33]. . . .	12
2.6. Chemische Zusammenhänge und Abfolge des exothermen Durchgehens von Li-Ionen-Zellen, in Anlehnung an [13].	13
2.7. Exemplarische Versuchspläne mit zwei Variationsgrößen.	16
2.8. Ausgewählte initiale Fließflächen für $f(\sigma) = 0$ im Haigh-Westergaard Spannungsraum mit etwaigen Spannungszuständen aus prinzipiellen Belastungsszenarien, in Anlehnung an [4].	22
2.9. Visualisierung der Abhängigkeit des plastischen Potentials gemäß Gl. (2.25) and Gl. (2.26).	24
2.10. Visualisierung der Ermittlung des Spannungsinkrements unter Darstellung von Fließregel nach Deshpande-Fleck gemäß Gl. (2.15) und plastischem Potential für $\nu_p = 0$ gemäß Gl. (2.26).	25
2.11. Darstellung der Verfestigungskurve des <i>Crushable Foam</i> Modells in der Software LS Dyna.	28
4.1. Schematische Abbildung einer typischen prismatischen Zellen im Automobilsektor mit zwei Jellyrolls.	34
4.2. Experimentaler Aufbau: (a): Frontalansicht des Prüfstands. (b): Fotografie eines Versuchsaufbaus Szenario S innerhalb der Prüfkammer. (c)-(e): Schematische Darstellung der drei Belastungsszenarien S, Z und U. (f): Schnittbild des kraftlimitierenden Vorrichtung bei Prüfkonfiguration S und Z.	36
4.3. Schematisches, maßstabsgetreues Deformationsbild eines strukturintegrierten Hochvoltspeichers bei einer EuroNCAP-Pfahlerash-Simulation mit seitlicher Intrusion ins Fahrzeug.	38
4.4. Phasen einer Messung.	40

III. Abbildungsverzeichnis

4.5. Schematischer Versuchsplan mit Gegenüberstellung interessierender Einflussfaktor und Beobachtungsgrößen.	42
4.6. Exemplarische Messdaten der Kompressionsphase, die die gemessene Kompressionskraft F und die Zellspannung U als Funktion des relativen Intrusion I zeigen. Die charakteristischen kritischen Werte I_c und F_c werden durch einen signifikanten Abfall der Zellspannung bestimmt.	44
4.7. Kumulative Verteilungsfunktionen der Bestimmtheitsmaße für die Szenarien S, Z und U.	45
4.8. Verfestigungskurven gemäß Gl. (4.2) für unterschiedliche Faktorstufen der Intrusionsrate \dot{I}	46
4.9. Abhängigkeit der Verfestigungsparameter B und n von der Intrusionsrate \dot{I} für alle Prüflinge.	47
4.10. Mess- und Durchschnittswerte sowie dreifache Standardabweichungen s der kritischen Intrusionen I_c und Deformationskräfte F_c als Funktion der Intrusionsrate \dot{I} in ausgewählten Szenarien.	50
4.11. Durchschnittswerte, negative dreifache Standardabweichungen s und deren Trendlinie von kritischer Intrusion I_c und Deformationskraft F_c als Funktion der Intrusionsrate \dot{I} in Szenario S und U.	51
4.12. Oben: Intrusionen bei Versagen der Siegelnaht über vier Größenordnungen von \dot{I} . Unten links: Geometrische Skizze der deformierten Zellsilhouette im Versagensmoment. Unten rechts: Tomogramm einer neuwertigen Zelle L _s	54
4.13. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei identischen Intrusionen je Faktorstufe von \dot{I} der Prüflinge H _p in Szenario S.	55
4.14. Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei identischen Intrusionen je Faktorstufe von \dot{I} der Prüflinge H _p in Szenario U.	57
5.1. Ausschnitt aus einem Hochgeschwindigkeitsvideo und geometrisch abgeleitete Vereinfachung zur analytischen Beschreibung.	67
5.2. Prognose $F(I)$ des analytischen Modells gegenüber den experimentellen Verfestigungskurven für quasistatische Belastungen.	68
5.3. Qualitative Gegenüberstellung des Kontinuumsverhaltens bei idealer gegenüber nicht-idealer Kompressibilität im Modellbeispiel.	69
5.4. Phänomenologisch basiertes Verfestigungsgesetz, exemplarisch parametrisiert mit \mathfrak{P}_s , $C = 3$ und $\varepsilon_{SP} = 0, 2$	70
5.5. FEM-Modelle der Szenarien Z und S.	71
5.6. Darstellung der im FE-Modell vorhandenen Energien $\neq 0$ über der Deformation bis $d(t_{ges}) = 10mm$ mit $I = 10^2 s^{-1}$	72
5.7. <i>True-Predicted</i> -Diagramm der Antwortfläche gegenüber den Simulationsdaten.	74
5.8. <i>True-Predicted</i> -Diagramm der Simulationsdaten gegenüber den Experimentaldaten.	75
5.9. Vergleich des makroskopischen Verformungsbildes bei $I = 40\%$ und $\dot{I} \approx 4 \cdot 10^{-1} s^{-1}$	76
5.10. Schematische Darstellung des Deformationsverlaufs eines Elements und des kritischen Deformationszustands.	77

6.1.	Darstellung der Konzeptadaption zur Steigerung des gravimetrischen und volumetrischen Energieinhalts.	80
6.2.	Auswertung der auftretenden $\varepsilon_{p,\perp} - \dot{\varepsilon}_{p,\perp}$ -Verläufe analog zu 5.10 aus den Gesamtfahrzeugrechnungen mit in den Deformationsbereich verschobenen Zellmodulen.	81

IV. Tabellenverzeichnis

2.1. Kommerzielle Alternativen für Kobaltoxid [1].	8
2.2. Publierte experimentelle Studien zur Charakterisierung des mechanischen Materialverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen.	18
2.3. Publierte Ansätze zur Modellierung des mechanischen Materialverhaltens von Lithium-Ionen-Zellen.	27
4.1. Identifikatoren der Prüflingstypen.	35
4.2. Definition der geschwindigkeitsabhängigen Datenaufzeichnungsraten.	39
4.3. Konkreter Versuchsplan für die im Rahmen der Arbeit durchgeführten Testkampagne.	42
4.4. Gegenüberstellung der Trendlinienparameter zur Approximation der Abhängigkeit der Mittelwerte der Verfestigungsparametern \bar{B} und \bar{n} von \dot{I} . . .	48
4.5. Gegenüberstellung der Trendlinienparameter zur Approximation der Abhängigkeit $\bar{I}_c - 3s$ und $\bar{F}_c - 3s$ in Prozent.	52
4.6. Qualitativer Überblick der identifizierten Phänomene in Relation zu den interessierenden Faktoren des Versuchsplans.	58

V. Literaturverzeichnis

- [1] R. Korthauer, Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2.
- [2] S. Ginsberg, Entwicklung eines crashdeformierbaren Batteriesystems für elektrisch angetriebene Fahrzeuge, Ph.D. thesis, RWTH Aachen (2015).
- [3] B. Scrosati, J. Garche, Lithium batteries: Status, prospects and future, Journal of Power Sources 195 (9) (2010) 2419–2430 (2010). doi:10.1016/j.jpowsour.2009.11.048.
- [4] J. Zhu, T. Wierzbicki, W. Li, A review of safety-focused mechanical modeling of commercial lithium-ion batteries, Journal of Power Sources 378 (2018) 153–168 (2018). doi:10.1016/j.jpowsour.2017.12.034.
- [5] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V., Automobildatenbank, <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokatalog/detail.aspx?mid=294292&bezeichnung=audi-e-tron-55-quattro>, letzter Zugriff: 27.09.2019.
- [6] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V., Automobildatenbank, <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokatalog/detail.aspx?mid=294014&bezeichnung=mercedes-eqc-400-4matic>, letzter Zugriff: 27.09.2019.
- [7] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e. V., Automobildatenbank, <https://www.adac.de/infotestrat/autodatenbank/autokatalog/detail.aspx?mid=261294&bezeichnung=tesla-model-s-p100d-16-19>, letzter Zugriff: 27.09.2019.
- [8] P. Lamp, Anforderungen an Batterien für die Elektromobilität, in: R. Korthauer (Ed.), Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 393–415 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2_32.
- [9] S. Arora, A. Kapoor, Mechanical Design and Packaging of Battery Packs for Electric Vehicles, in: G. Pistoia, B. Liaw (Eds.), Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles, Vol. 8 of Green Energy and Technology, Springer International Publishing, Cham, 2018, pp. 175–200 (2018). doi:10.1007/978-3-319-69950-9_8.
- [10] J. Shibayama, <https://www.tesla.com/customer-stories/model-s-owner-tennessee>, letzter Zugriff: 27.09.2019 (2013).
- [11] Y. Xia, T. Wierzbicki, E. Sahraei, X. Zhang, Damage of cells and battery packs due to ground impact, Journal of Power Sources 267 (2014) 78–97 (2014). doi:10.1016/j.jpowsour.2014.05.078.

V. Literaturverzeichnis

- [12] M. Vogt, Funktionale Sicherheit von Fahrzeugen, in: R. Korthauer (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 307–320 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2_25.
- [13] M. Fleischhammer, H. Döring, Chemische Sicherheit, in: R. Korthauer (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Vol. 104, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 285–298 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2_23.
- [14] H. Sattler, Elektrische Sicherheit, in: R. Korthauer (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 299–306 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2_24.
- [15] F.-M. Volk, M. Winkler, B. Hermann, H. Rapp, T. Kuttner, Influence of state of charge and state of health on the vibrational behavior of lithium-ion cell packs, 23rd International Congress on Sound & Vibration (2016) 1–8 (2016).
- [16] S. Abada, G. Marlair, A. Lecocq, M. Petit, V. Sauvant-Moynot, F. Huet, Safety focused modeling of lithium-ion batteries: A review, *Journal of Power Sources* 306 (2016) 178–192 (2016). doi:10.1016/j.jpowsour.2015.11.100.
- [17] S. P. Nadimpalli, V. A. Sethuraman, D. P. Abraham, A. F. Bower, P. R. Guduru, Stress Evolution in Lithium-Ion Composite Electrodes during Electrochemical Cycling and Resulting Internal Pressures on the Cell Casing, *Journal of the Electrochemical Society* 162 (14) (2015) A2656–A2663 (2015). doi:10.1149/2.0341514jes.
- [18] G. Bucci, T. Swamy, S. Bishop, B. W. Sheldon, Y.-M. Chiang, W. C. Carter, The Effect of Stress on Battery-Electrode Capacity, *Journal of the Electrochemical Society* 164 (4) (2017) A645–A654 (2017). doi:10.1149/2.0371704jes.
- [19] J. Cannarella, C. B. Arnold, State of health and charge measurements in lithium-ion batteries using mechanical stress, *Journal of Power Sources* 269 (2014) 7–14 (2014).
- [20] R. Fu, M. Xiao, S.-Y. Choe, Modeling, validation and analysis of mechanical stress generation and dimension changes of a pouch type high power Li-ion battery, *Journal of Power Sources* 224 (2013) 211–224 (2013).
- [21] J. M. Hooper, J. Marco, Experimental modal analysis of lithium-ion pouch cells, *Journal of Power Sources* 285 (2015) 247–259 (2015).
- [22] W. Li, Y. Xia, J. Zhu, H. Luo, State-of-Charge Dependence of Mechanical Response of Lithium-Ion Batteries: A Result of Internal Stress, *Journal of the Electrochemical Society* 165 (7) (2018) A1537–A1546 (2018). doi:10.1149/2.0051809jes.
- [23] B. Rieger, S. F. Schuster, S. V. Erhard, P. J. Osswald, A. Rheinfeld, C. Willmann, A. Jossen, Multi-directional laser scanning as innovative method to detect local cell damage during fast charging of lithium-ion cells, *Journal of Energy Storage* 8 (2016) 1–5 (2016). doi:10.1016/j.est.2016.09.002.
- [24] B. Rieger, S. Schlueter, S. v. Erhard, A. Jossen, Strain Propagation in Lithium-Ion Batteries from the Crystal Structure to the Electrode Level, *Journal of the Electrochemical Society* 163 (8) (2016) A1595–A1606 (2016). doi:10.1149/2.0431608jes.

- [25] B. Rieger, S. v. Erhard, K. Rumpf, A. Jossen, A New Method to Model the Thickness Change of a Commercial Pouch Cell during Discharge, *Journal of the Electrochemical Society* 163 (8) (2016) A1566–A1575 (2016). doi:10.1149/2.0441608jes.
- [26] S. A. Roberts, V. E. Brunini, K. N. Long, A. M. Grillet, A Framework for Three-Dimensional Mesoscale Modeling of Anisotropic Swelling and Mechanical Deformation in Lithium-Ion Electrodes, *Journal of the Electrochemical Society* 161 (11) (2014) F3052–F3059 (2014). doi:10.1149/2.0081411jes.
- [27] G. Kermani, E. Sahraei, Review: Characterization and Modeling of the Mechanical Properties of Lithium-Ion Batteries, *Energies* 10 (11) (2017) 1730 (2017). doi:10.3390/en10111730.
- [28] M. Maurer, H. Winner, *Automotive Systems Engineering*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013 (2013). doi:10.1007/978-3-642-36455-6.
- [29] S. Erhard, *Mehrdimensionale elektrochemisch-thermische Modellierung von Lithium-Ionen-Batterien*, Dissertation, Universitätsbibliothek der TU München, München (2017).
- [30] C. Daniel, Materials and processing for lithium-ion batteries, *JOM* 60 (9) (2008) 43–48 (2008). doi:10.1007/s11837-008-0116-x.
- [31] R. A. Huggins, *Advanced batteries: Materials science aspects*, Springer US, Boston, MA, 2009 (2009). doi:10.1007/978-0-387-76424-5.
- [32] N. Nitta, F. Wu, J. T. Lee, G. Yushin, Li-ion battery materials: present and future, *Materials Today* 18 (5) (2015) 252–264 (2015). doi:10.1016/j.mattod.2014.10.040.
- [33] T. Wöhrle, Lithium-Ionen-Zelle, in: R. Korthauer (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Vol. 414, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 107–117 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2_9.
- [34] P. W. Atkins, J. de Paula, *Elements of physical chemistry*, 7th Edition, Oxford University Press, Oxford, 2017 (2017).
- [35] K. Vuorilehto, Materialien und Funktion, in: R. Korthauer (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Vol. 414, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 21–29 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2_3.
- [36] T. B. Reddy, D. Linden (Eds.), *Linden’s handbook of batteries*, 4th Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 2011 (2011).
- [37] C. Daniel, J. O. Besenhard, *Handbook of Battery Materials*, Wiley, Weinheim, 2012 (2012).
URL <http://gbv.ebilib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1120500>
- [38] C. Graf, Kathodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien, in: R. Korthauer (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Vol. 141, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 31–44 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2_4.

V. Literaturverzeichnis

- [39] C. Wurm, O. Öttinger, S. Wittkämper, R. Zauter, K. Vuorilehto, Anodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien, in: R. Korthauer (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Vol. 110, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 45–60 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2_5.
- [40] K.-H. Pettinger, Fertigungsprozesse von Lithium-Ionen-Zellen, in: R. Korthauer (Ed.), *Handbuch Lithium-Ionen-Batterien*, Vol. 196, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013, pp. 221–235 (2013). doi:10.1007/978-3-642-30653-2_17.
- [41] S. J. Cooper, D. S. Eastwood, J. Gelb, G. Damblanc, D. Brett, R. S. Bradley, P. J. Withers, P. D. Lee, A. J. Marquis, N. P. Brandon, P. R. Shearing, Image based modelling of microstructural heterogeneity in LiFePO₄ electrodes for Li-ion batteries, *Journal of Power Sources* 247 (2014) 1033–1039 (2014). doi:10.1016/j.jpowsour.2013.04.156.
- [42] D.-W. Chung, P. R. Shearing, N. P. Brandon, S. J. Harris, R. E. García, Particle Size Polydispersity in Li-Ion Batteries, *Journal of the Electrochemical Society* 161 (3) (2014) A422–A430 (2014). doi:10.1149/2.097403jes.
- [43] S. S. Zhang, A review on electrolyte additives for lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources* 162 (2) (2006) 1379–1394 (2006). doi:10.1016/j.jpowsour.2006.07.074.
- [44] G. Pistoia, B. Liaw, *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles*, Springer International Publishing, Cham, 2018 (2018). doi:10.1007/978-3-319-69950-9.
- [45] S. Al Hallaj, H. Maleki, J. S. Hong, J. R. Selman, Thermal modeling and design considerations of lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources* 83 (1-2) (1999) 1–8 (1999). doi:10.1016/S0378-7753(99)00178-0.
- [46] US Department of Energy, *FreedomCAR Battery Test Manual For Power-Assist Hybrid Electric Vehicles: DOE/ID-11069* (Oktober 2003).
- [47] US Department of Energy, *FreedomCAR Electrical Energy Storage System Abuse Test Manual for Electric and Hybrid Electric Vehicle Applications: (DOE) SAND2005-3123* (August 2006).
- [48] United Nations, *Recommendations on the transport of dangerous goods - manual of tests and criteria* (2015).
- [49] Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa, *Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb* (31.05.2015).
- [50] K. Siebertz, D. van Bebber, T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*, VDI-Buch, Springer, Heidelberg, 2010 (2010). doi:10.1007/978-3-642-05493-8.
- [51] H. Bandemer, A. Bellmann, *Statistische Versuchsplanung*, 4th Edition, Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Teubner, Stuttgart, 1994 (1994).

- [52] I. Avdeev, M. Gilaki, Structural analysis and experimental characterization of cylindrical lithium-ion battery cells subject to lateral impact, *Journal of Power Sources* 271 (2014) 382–391 (2014). doi:10.1016/j.jpowsour.2014.08.014.
- [53] E. Sahraei, J. Campbell, T. Wierzbicki, Modeling and short circuit detection of 18650 Li-ion cells under mechanical abuse conditions, *Journal of Power Sources* 220 (2012) 360–372 (2012). doi:10.1016/j.jpowsour.2012.07.057.
- [54] L. Greve, C. Fehrenbach, Mechanical testing and macro-mechanical finite element simulation of the deformation, fracture, and short circuit initiation of cylindrical Lithium ion battery cells, *Journal of Power Sources* 214 (2012) 377–385 (2012).
- [55] J. Zhu, X. Zhang, E. Sahraei, T. Wierzbicki, Deformation and failure mechanisms of 18650 battery cells under axial compression, *Journal of Power Sources* 336 (2016) 332–340 (2016). doi:10.1016/j.jpowsour.2016.10.064.
- [56] J. Xu, B. Liu, X. Wang, D. Hu, Computational model of 18650 lithium-ion battery with coupled strain rate and SOC dependencies, *Applied Energy* 172 (2016) 180–189 (2016). doi:10.1016/j.apenergy.2016.03.108.
- [57] J. Xu, B. Liu, D. Hu, State of Charge Dependent Mechanical Integrity Behavior of 18650 Lithium-ion Batteries, *Scientific reports* 6 (2016) 21829 (2016). doi:10.1038/srep21829.
- [58] S. H. Chung, T. Tancogne-Dejean, J. Zhu, H. Luo, T. Wierzbicki, Failure in lithium-ion batteries under transverse indentation loading, *Journal of Power Sources* 389 (2018) 148–159 (2018). doi:10.1016/j.jpowsour.2018.04.003.
- [59] M. Y. Ali, W.-J. Lai, J. Pan, Computational models for simulations of lithium-ion battery cells under constrained compression tests, *Journal of Power Sources* 242 (2013) 325–340 (2013).
- [60] M. Y. Ali, W.-J. Lai, J. Pan, Computational models for simulation of a lithium-ion battery module specimen under punch indentation, *Journal of Power Sources* 273 (2015) 448–459 (2015).
- [61] W.-J. Lai, M. Y. Ali, J. Pan, Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery cells under compressive loading conditions, *Journal of Power Sources* 245 (2014) 609–623 (2014).
- [62] W.-J. Lai, M. Y. Ali, J. Pan, Mechanical behavior of representative volume elements of lithium-ion battery modules under various loading conditions, *Journal of Power Sources* 248 (2014) 789–808 (2014).
- [63] E. Sahraei, J. Meier, T. Wierzbicki, Characterizing and modeling mechanical properties and onset of short circuit for three types of lithium-ion pouch cells, *Journal of Power Sources* 247 (2014) 503–516 (2014).
- [64] E. Sahraei, R. Hill, T. Wierzbicki, Calibration and finite element simulation of pouch lithium-ion batteries for mechanical integrity, *Journal of Power Sources* 201 (2012) 307–321 (2012).

V. Literaturverzeichnis

- [65] T. Kisters, E. Sahraei, T. Wierzbicki, Dynamic impact tests on lithium-ion cells, *International Journal of Impact Engineering* 108 (2017) 205–216 (2017). doi:10.1016/j.ijimpeng.2017.04.025.
- [66] P. Kotter, T. Kisters, A. Schleicher, Dynamic impact tests to characterize the crashworthiness of large-format lithium-ion cells, *Journal of Energy Storage* 26 (2019). doi:10.1016/j.est.2019.100948.
- [67] J. Meier, E. Sahraei, M. Salk, T. Kisters, F. Huberth, State of Charge vs. Thermal Runaway for Lithium Ion Large Pouch Cells (2013).
- [68] T. Wierzbicki, E. Sahraei, Homogenized mechanical properties for the jellyroll of cylindrical Lithium-ion cells, *Journal of Power Sources* 241 (2013) 467–476 (2013).
- [69] H. Altenbach, *Kontinuumsmechanik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015 (2015). doi:10.1007/978-3-662-47070-1.
- [70] H. Parisch, *Festkörper-Kontinuumsmechanik: Von den Grundgleichungen zur Lösung mit Finiten Elementen*, Teubner Studienskripten Soziologie, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2003 (2003). doi:10.1007/978-3-322-80052-7.
- [71] H. Altenbach, A. Öchsner (Eds.), *Plasticity of pressure-sensitive materials: Phenomenological yield and failure criteria*, Engineering materials, Springer, Berlin u.a, 2014 (2014).
- [72] W. Becker, D. Gross, *Mechanik elastischer Körper und Strukturen*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg and s.l., 2002 (2002). doi:10.1007/978-3-642-56124-5.
- [73] J. Besson, G. Cailletaud, J.-L. Chaboche, S. Forest, *Non-Linear Mechanics of Materials*, Vol. 167 of *Solid Mechanics and Its Applications*, Springer Science+Business Media B.V, Dordrecht, 2010 (2010). doi:10.1007/978-90-481-3356-7.
- [74] J. Betten, *Kontinuumsmechanik: Elastisches und inelastisches Verhalten isotroper und anisotroper Stoffe ; mit 20 Tabellen und 250 Übungsaufgaben ; [ein Lehr- und Arbeitsbuch ; mit durchgerechneten Lösungen*, 2nd Edition, Springer, Berlin, 2001 (2001).
- [75] Drucker, D.C., Prager, W., *Soil Mechanics and Plastic Analysis for Limit Design*, *Quarterly of Applied Mechanics* (1952) 157–165 (1952).
- [76] A. L. Gurson, Continuum Theory of Ductile Rupture by Void Nucleation and Growth: Part I—Yield Criteria and Flow Rules for Porous Ductile Media, *Journal of Engineering Materials and Technology* 99 (1) (1977) 2 (1977). doi:10.1115/1.3443401.
- [77] V. S. Deshpande, N. A. Fleck, Isotropic constitutive models for metallic foams, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 48 (6-7) (2000) 1253–1283 (2000). doi:10.1016/S0022-5096(99)00082-4.
- [78] P. Ludwik, *Elemente der Technologischen Mechanik*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg and s.l., 1909 (1909). doi:10.1007/978-3-662-40293-1.

- [79] G. W. Johnson, W. H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates, temperatures and pressure, Proceedings of the 21st international symposium on ballistics (1983) 541–547 (1983).
- [80] P. S. Follansbee, U. F. Kocks, A constitutive description of the deformation of copper based on the use of the mechanical threshold stress as an internal state variable, Journal of Power Sources 36 (1988) 81–93 (1988). doi:10.1016/0001-6160(88)90030-2.
- [81] U. F. Kocks, Realistic constitutive relations for metal plasticity, Materials Science and Engineering 317 (2001) 181–187 (2001). doi:10.1016/S0921-5093(01)01174-1.
- [82] H. Altenbach, A. Öchsner (Eds.), Plasticity of pressure-sensitive materials: Basic equations of continuum mechanics, Engineering materials, Springer, Berlin u.a, 2014 (2014).
- [83] J. N. Reddy, An introduction to the finite element method, reprinted. Edition, McGraw-Hill series in mechanical engineering, Oxford Univ. Press, Oxford, 2006 (2006).
URL <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0618/2004058177-d.html>
- [84] W. Polifke, J. Kopitz, Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden, 2nd Edition, Always learning, Pearson Studium, München u.a, 2009 (2009).
URL <http://lib.myilibrary.com/detail.asp?id=505990>
- [85] S. S. Rao, The finite element method in engineering, 5th Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2011 (2011).
- [86] G. Kermani, E. Sahraei, Dynamic impact response of lithium-ion batteries, constitutive properties and failure model, RSC Advances 9 (5) (2019) 2464–2473 (2019). doi:10.1039/C8RA08898E.
- [87] Verband der Automobilindustrie, Das gemeinsame Qualitätsmanagement in der Lieferkette: Produktentstehung, Produktherstellung und Produktlieferung (01.10.2011).
- [88] H. Wang, E. Lara-Curzio, E. T. Rule, C. S. Winchester, Mechanical abuse simulation and thermal runaway risks of large-format Li-ion batteries, Journal of Power Sources 342 (2017) 913–920 (2017). doi:10.1016/j.jpowsour.2016.12.111.
- [89] J. Xu, B. Liu, L. Wang, S. Shang, Dynamic mechanical integrity of cylindrical lithium-ion battery cell upon crushing, Engineering Failure Analysis 53 (2015) 97–110 (2015). doi:10.1016/j.engfailanal.2015.03.025.
- [90] L. Nasdala, FEM-Formelsammlung Statik und Dynamik: Hintergrundinformationen, Tipps und Tricks, 1st Edition, Studium, Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, Wiesbaden, 2010 (2010). doi:10.1007/978-3-8348-9922-4.